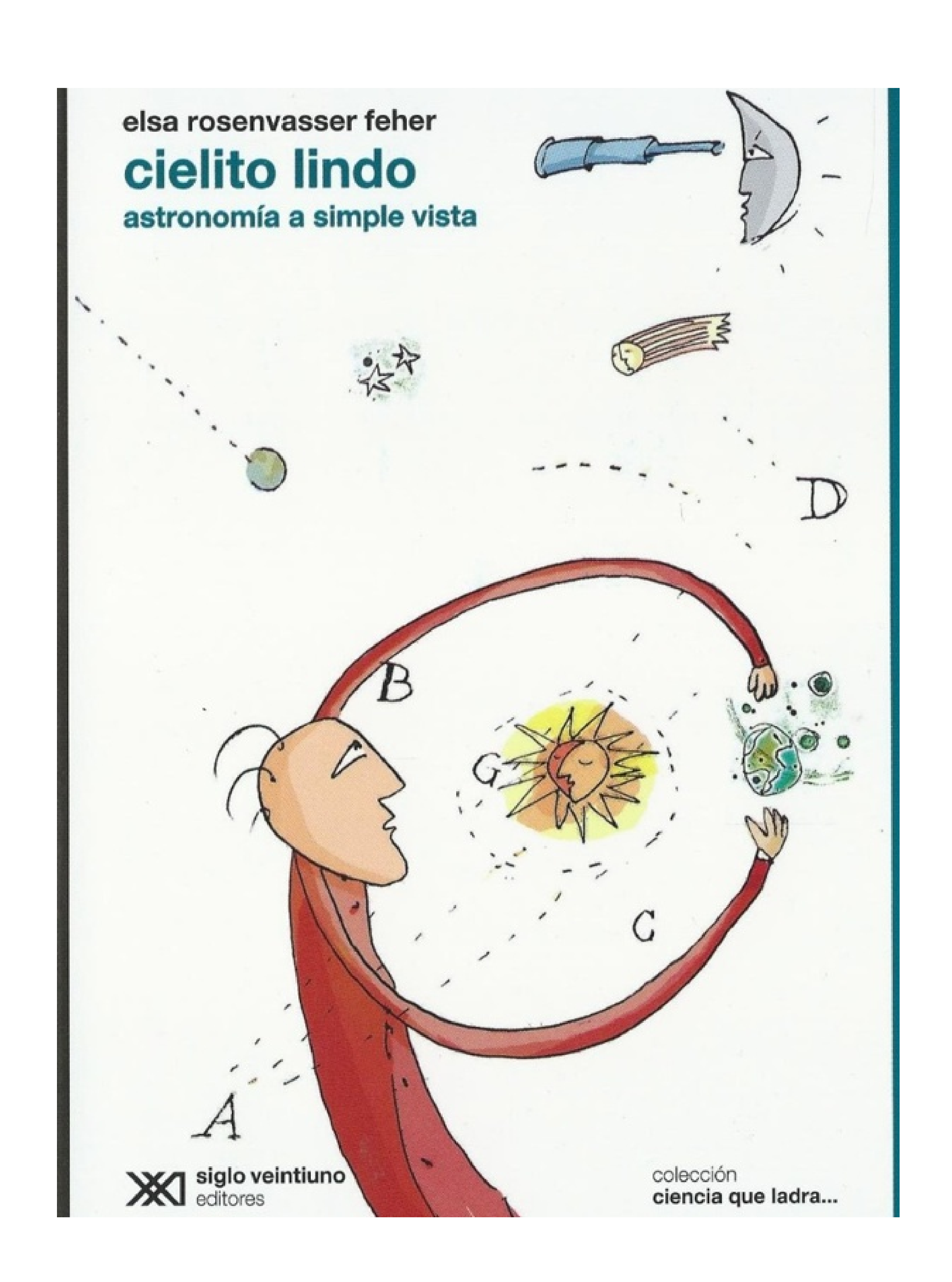


elsa rosenvasser feher
cielito lindo
astronomía a simple vista
D
B
G
C
A
siglo veintiuno
editores
colección
ciencia que ladra...

Presentación

Qué son esas luces que se mueven en el cielo nocturno? ¿O somos nosotros los que nos movemos? Si vemos salir y ponerse el Sol todos los días, ¿por qué decimos que es la Tierra la que gira? Y la luna, ¿qué cara tiene? ¿Se puede "leer" el cielo basado en las sombras del Sol y en el movimiento de las estrellas y los planetas? Para conocer este cielito lindo no hacen falta supertelescopios, ni computadoras, ni siquiera anteojos. Elsa Rosenvasser Feher nos enseña a mirar hacia arriba, a seguir los astros noche tras noche o, con cuidado, a recorrer el cielo diurno subidos al carro del Sol. En el camino, viajamos junto con Pitágoras, con Ptolomeo, con Copérnico, con Galileo Galilei. ¿Quién no querría viajar con semejante compañíía? ¿Quién no miró hacia arriba y se sintió parte de ese cielo que da vueltas?

Porque todavía se mueve, y porque también es parte de nuestro camino, a este cielo se lo recorre subidos a la ciencia. Y mirando para arriba.

Acerca de la autora

Elsa Rosenvasser Feher

Se licenció en Físicomatemáticas en la Universidad de Buenos Aires, cuando todavía estaba en la Manzana de las Luces, en el centro de la ciudad. Se doctoró en Física en la Universidad de Columbia de la ciudad de Nueva York y se ocupó durante varios años de la investigación experimental en el campo de la física del estado sólido (que hoy se llamaría “materia condensada”) en la Universidad de California, San Diego. Con el nacimiento de sus hijas viraron sus intereses y desde entonces se ha dedicado, de una forma u otra, a proyectos que involucran la enseñanza de ciencia a docentes y al público no experto. Como profesora en la Universidad Estatal de San Diego, desarrolló y enseñó una serie de cursos para futuros maestros. También comenzó un programa de investigación sobre las barreras conceptuales de los alumnos frente al aprendizaje de las ciencias físicas, un área que a la sazón (las postrimerías de los años setenta) era novedosa.

Durante catorce años a partir de 1983 dirigió el establecimiento del grupo de creación y desarrollo de módulos y exposiciones interactivas en el Centro de Ciencias Reuben Fleet de San Diego. Ahora trabaja con jóvenes científicos argentinos en una variedad de proyectos educativos (salas de museos, campamentos, libros para docentes y de divulgación). Esta labor "de retorno a la patria" le produce inmensa satisfacción.

Capítulo 1
La función que nunca termina

Ay, ay, ay, ay, canta y no llores,
que yo les daré el secreto,
cielito lindo, pa' que te exploren...

Agujeros negros, galaxias lejanas; telescopios espaciales, receptores infrarrojos; teorías cosmológicas, cosmogonías: esta es una lista de algunos de los temas que no vamos a tratar en este libro. Con lo interesante que es todo eso, ¿por qué no? Por un lado, porque eso es lo más moderno, la astronomía de punta, y de eso ya se ocupan los medios, los astrónomos y otros libros de divulgación. Y por otro lado, porque la astronomía clásica, aquella que todos pueden apreciar usando tan solo sus propios ojos, también es fascinante pero desconocida por la mayor parte de la población, y raramente expuesta en forma coherente. Y esto es lo que sí vamos a tratar en este libro.

Durante los muchos años que enseñé ciencias, cuando
les preguntaba a mis alumnos qué parte del curso les había gustado más, la mayoría contestaba: "Astronomía". Claro que el curso cubría propiedades de la materia, ondas, naturaleza de la luz, y otros temas a mi juicio muy lindos. "¿Por qué astronomía?", quería saber. Y la respuesta más o menos in-variante era "porque lo que sucede allí en el cielo noche tras noche, día tras día, es increíble. Y no puedo creer que llegué a ser adulto sin percatarme de algo que estaba ahí para que yo lo viera cualquier día, en cualquier lado. Y que con un poco de atención podría predecir lo que iba a verse en el cielo dentro de una semana o un mes, o lo que había pasado hacía una semana o un mes".

Esa es la fascinación que quiero trasmitir en estas páginas. La fascinación de sentirse parte de un universo constante, predecible, invariante porque uno lo lleva consigo cuando viaja y, si lo conocemos bien en donde vivimos, lo reconoceremos como cielo amigo en cualquier lugar extraño en que nos encontremos. La fascinación, también, de conocer los cielos como los conocían los egipcios y los

babilonios, y de entenderlos como los entendían los griegos. Y como los entendemos nosotros a partir de la gran síntesis newtoniana de todos los movimientos, terrestres y celestes.

Nuestro itinerario de exploración comienza con la luna, sigue con el sol, pasa por las estrellas y termina con los planetas. Esta secuencia de observaciones seguramente no fue la de los babilonios y egipcios. Los registros históricos indican que los antiguos concentraban su atención, inicialmente, en lo que sucedía en el horizonte, en el lugar del horizonte donde se levanta o se pone un astro. Muy especialmente se fijaban en las estrellas, porque son los únicos astros visibles que mantienen constante, a lo largo del tiempo, el lugar sobre el horizonte en donde salen y se ponen.

Sin iluminación artificial nocturna, que aclara el cielo y diluye la luz de las estrellas, sin polución, sin edificios altos que obstruyen el horizonte, nuestros antepasados podían pasar la noche entera siguiendo el curso de las estrellas en el cielo. Para nosotros, en las grandes ciudades, las trayectorias de la luna y el sol cuando están altos en el cielo son más conocidas que las estrellas o las posiciones de los astros sobre el horizonte.

Un poco de historia

Los primeros registros históricos de la astronomía antigua se remontan a los babilonios y egipcios. Los babilonios no tenían papel y lápiz, pero eso no les impidió hacer su documentación escribiendo con palitos en tabletas de arcilla, hace unos cinco mil años. Los egipcios, antes de haber inventado el papiro, usaban sus templos y tumbas-pirámides como puntos de referencia. Por ejemplo, cuando la estrella Sirio estaba en el este al amanecer, y el primer rayo de sol entraba por una rendija en una tumba e iluminaba la cara de la estatua del faraón ahí dentro... entonces se sabía que estaban por empezar las inundaciones del Nilo. Ese era el comienzo de lo que ahora llamamos verano.

La idea de usar monumentos para documentar -y por lo tanto poder predecir- los movimientos repetitivos de los astros que se notan a simple vista aparece en forma independiente en distintos pueblos en distintas épocas. Así, en Inglaterra, los habitantes de hace dos mil años hicieron grandes construcciones con enormes

piedras que se supone eran calendarios. También hay evidencia de que los templos de Teotihuacán y Tenochtitlán en la Mesoamérica precolombina funcionaban como observatorios astronómicos.

Los escritos (códices) mayas y aztecas que se han preservado[1] contienen almanaques solares y lunares, y hasta un calendario con la descripción de cien años de los movimientos de Venus.

Sabemos que los fenicios, que eran grandes navegadores, empleaban las estrellas para orientarse en el mar Mediterráneo. Y así también los polinesios; la historia del descubrimiento de Hawaii es la de una larguísima travesía, guiada por los cielos, a través del océano Pacífico.

Podríamos decir que las observaciones celestiales de los antiguos tenían tres objetivos: por un lado, la fase religiosa, de adoración, en la que el sol, la luna, los planetas y las estrellas son divinidades. Por otro, la fase pragmática de construir mapas para la navegación y calendarios que permitieran determinar las fechas del culto y las épocas para arar, sembrar, recoger la cosecha. En el medio queda el ejercicio de la astrología, que es la creencia en la influencia celeste sobre lo humano y consiste en emplear lo que ocurre en el cielo para predecir lo que va a suceder en la Tierra.

Nuestro punto de partida

La idea de hacer observaciones por el mero afán de adquirir conocimientos es muy reciente. Hemos heredado de los griegos esta ansia del saber por saber, el gusto por las teorías y explicaciones. Cuando decimos que la ciencia occidental tal como la conocemos tiene su origen en la forma de indagar de los griegos allá por los años 300 a.C., queremos significar que con los griegos nace la noción de ciencia como la búsqueda, por debate y consenso, de explicaciones racionales del mundo que nos rodea.

En la actualidad esta indagación continúa. Ya no adoramos al dios sol, no creemos en la astrología (¡esperemos que así sea!), ya tenemos nuestro calendario y nuestros geoposicionadores satelitales. Y sin embargo, queremos saber más del

---

[1] Los conquistadores españoles quemaron la mayor parte de los libros en lengua maya porque, según el primer arzobispo del Yucatán, "contenían sólo supersticiones y falsedades sobre el diablo".

mundo que nos rodea. Es por eso, suponemos, que el lector nos ha seguido hasta aquí.

Nuestro punto de partida en esta aventura conjunta son las observaciones, que nos pondrán al tanto de lo que ya conocían los griegos. Una vez generada la evidencia observacional —y recién entonces—, iremos proponiendo modelos que expliquen racionalmente los datos acumulados. El objetivo será construir una teoría que dé cuenta de los pormenores de los movimientos de los cuerpos celestiales. La historia de los modelos, cómo unos van suplantando a otros, la naturaleza de los debates y los tiempos transcurridos hasta que un modelo prima sobre otros... todo eso lo veremos en una vívida lección sobre lo que es, verdaderamente, una teoría científica aceptada.

¿Listo? Vamos, entonces, afuera, a mirar la función que nunca termina. Tomen nota: en el teatro celeste, donde la función nunca termina, los mejores asientos (aunque no es en absoluto necesario sentarse: se puede mirar perfectamente el espectáculo de pie) son los que miran al norte si uno vive en el hemisferio sur, o los que miran al sur si uno vive en el hemisferio norte. Para los que viven sobre el ecuador, habrá que mirar derechito hacia arriba. Y si no es del agrado del lector salir a mirar, puede quedarse sentado en su sillón leyendo, y saltearse todo lo que está impreso en bastardilla[2]. Sea como sea, ¡que lo disfruten!

[2] A lo largo del libro, varios de los textos en bastardilla indicarán ejercicios para que los lectores realicen, casi siempre mirando hacia arriba...

Capítulo 2
Luna lunera

"¿Cuál es más importante, la luna o el sol?"
"La luna", contestan los chicos, "porque nos alumbra de noche cuando está oscuro, mientras que de día hay luz de cualquier forma."

Luna lunera cascabelera,
¿dónde estás, adónde vas?

O, mejor aún, que la luna lunera nos diga qué hora es y qué cara tiene, y lo del lugar y el movimiento lo resolvemos nosotros.

La forma más interesante de hacerlo es realizar una serie de observaciones a lo largo de un mes. Si tienen la paciencia de mirar el cielo casi todos los días, haremos un estudio juntos. De lo contrario, pueden saltearse lo que sigue en bastardilla e ir derecho a la sección que da los resultados (¡pero así se van a perder la experiencia!).

> *Sabemos que la luna cambia de lugar en el cielo: un día está acá, en otro momento está allá. Para determinar en forma sistemática cuánto se mueve, necesitamos un instrumento para medir ángulos. Usaremos un instrumento portátil que llevamos siempre a cuestas: nuestro puño.*
>
> *¿Cómo medir ángulos con el puño? Siéntense frente a una mesa. Estiren un brazo sobre la mesa. Fíjense en que quede paralelo al piso. (Si no, ajusten las alturas de silla o mesa). Formen puños con las manos. Vayan poniendo un puño sobre otro, meñique sobre pulgar -para esto conviene que alguien los ayude a mantener la posición de los brazos- hasta que un brazo quede totalmente vertical, paralelo a las paredes:*

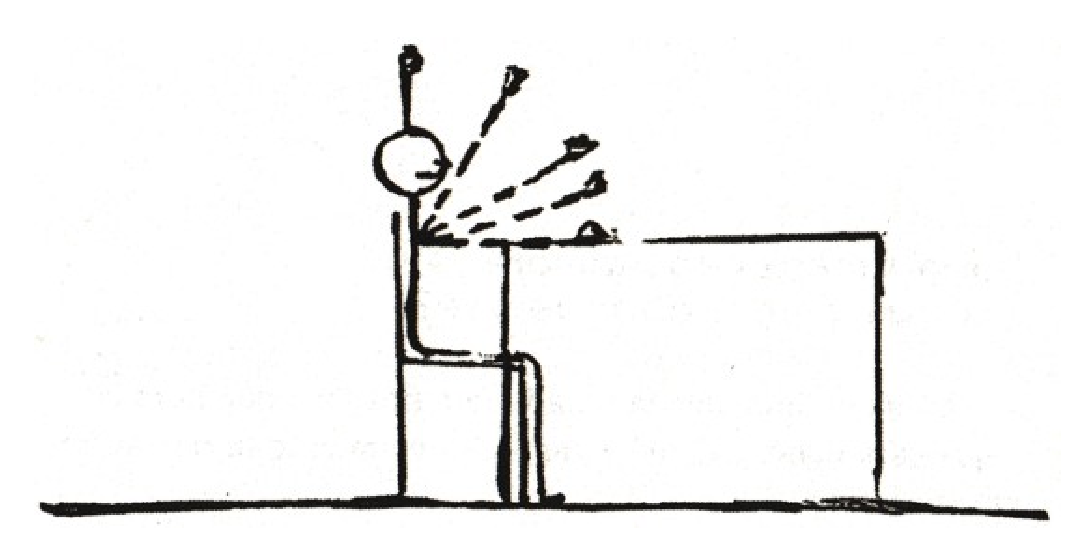


Figura 1. Calibrando el puño para medir ángulos

Ahora hay que contar cuántos puños se necesitan para cubrir los noventa grados entre el brazo horizontal y el brazo vertical. Dividiendo 90° por el número de puños, se obtiene el ángulo que mide el puño. Por ejemplo, yo necesito doce puños para cubrir el ángulo recto, así que un puño mío mide 7,5°.

Observación 1.

Además del puño, se necesitará un cuadernillo para ir anotando lo que observemos. Para empezar, tenemos que mirar el cielo hasta que encontremos la luna. (No sólo de noche: de día también se suele ver). Cuando la encontremos, debemos notar nuestra posición y ubicar la luna alineándola con algún objeto presente en el campo visual (un poste, una chimenea, un árbol) que sirva de referencia[3]. Con esto podemos realizar un croquis y anotar día y hora de la observación. Algo así:

---

[3] De paso, aclaremos que esta técnica de elegir dos puntos (uno donde estemos parados y otro de referencia) que permitan definir una línea recta para ubicar la luna es la mismísima que se usa en Stonehenge. (una de las grandes construcciones con enormes piedras -que se supone eran calendarios- en Inglaterra).



Figura 2. Ubicando la luna

Si regresamos una hora más tarde al mismo lugar, el dibujo podrá cambiar así:

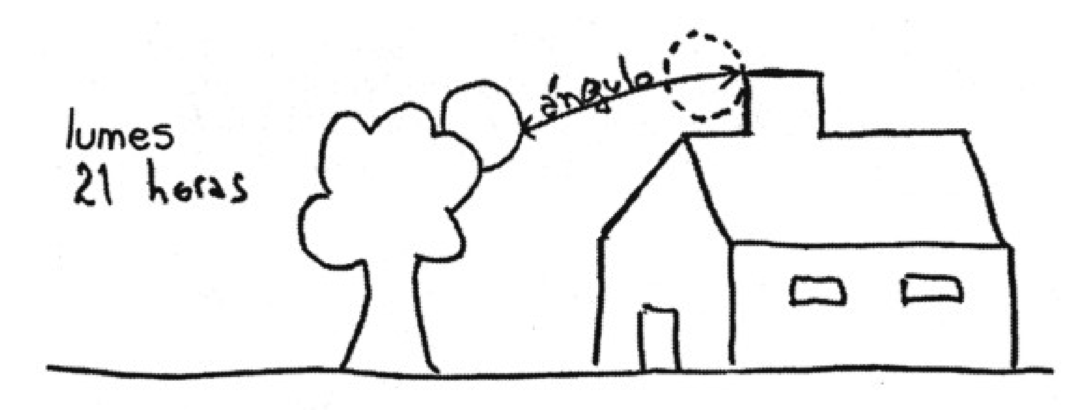


Figura 3. Desplazamiento de la luna

Midamos cuánto se movió la luna. ¿Cuántos puños? ¿Cuántos grados? El número en puños no sirve para comparar el resultado de diferentes personas. Pero los grados son una unidad universal, y ese resultado sí se puede comparar con el de los demás.

En el hemisferio sur (en la Argentina, por ejemplo) la luna se mueve de derecha a izquierda. En el hemisferio norte (en España, por ejemplo) la luna se mueve de izquierda a derecha. En ambos casos, el movimiento es de este a oeste, pero en el hemisferio sur, para seguir la luna un buen rato estaremos mirando al norte, mientras que en el hemisferio norte estaremos mirando al sur... En suma, para ver

la "carretera celeste" donde transitan el sol, la luna y las estrellas del zodíaco[4], tendremos que mirar en direcciones opuestas según el hemisferio en que estemos.

> ***Observación 2.***
> *Ahora haremos otra observación: uno o dos días más tarde, se deberá volver al mismo lugar a la misma hora del primer dibujo. Hagamos otro esquema mostrando la posición de la luna respecto de la referencia que hayamos elegido, y así podremos medir cuánto se movió la luna en un día.*
> *Sigamos cada día el movimiento de la luna a la misma hora, hasta que no la podamos seguir más. Notemos bien los cambios de forma de la luna; incluso podemos dibujarlos. ¿Por qué no la podemos seguir más? ¿Desapareció detrás de casas, árboles o montañas? ¿Se hizo tan pequeña que no la podemos ver? ¿Estaba acercándose demasiado al sol y era peligroso seguir mirando? ¿Estuvo nublado tantos días consecutivos que se perdió de vista? Es cuestión de buscarla en el cielo en otro momento y seguir notando los cambios de forma.*

¿Cuánto y cómo se mueve esa luna?

De hora en hora vemos que la luna se mueve del este al oeste (del mar hacia las montañas, en la Argentina) junto con el sol y las estrellas. Todo el firmamento parece moverse junto, quince grados por hora, como si fuera una gran bola. *¿La observación 1 dio esto como resultado?* (Un giro entero son trescientos sesenta grados en veinticuatro horas, o sea quince grados en una hora.)

De día en día la luna se mueve alrededor de la Tierra de oeste a este 12,5° (¿fue ése el resultado de la medición?), de modo que la vemos en el mismo lugar que el día anterior casi una hora más tarde. (Como la luna es responsable de las mareas en el océano, las mareas también se postergan casi una hora de día en día.)

Las caras de la luna

---

[4] El zodíaco es la banda de estrellas que se observa de noche en la zona del cielo en que vemos al sol durante el día.

A medida que pasan los días, la luna va cambiando su forma, su "cara", o lo que llamamos su "fase". El orden de las fases es siempre el mismo: si vemos la luna que parece una medialuna de esas que comemos con el café con leche (que, en rigor, no son ni medias ni cuartos) y después se va rellenando, la llamamos luna creciente; crece hasta llegar a ser llena y luego decrece -luna menguante- hasta que parece otra vez una medialuna de las que se comen, pero con las puntas mirando hacia el otro lado. ¿Hacia dónde apuntan las puntas? Hacia el oriente, si la luna es creciente. Para el otro lado si la luna ha menguado. La luna "nueva" es la que ocurre entre la luna menguante y la luna creciente, cuando no la vemos.

La luna tarda cuatro semanas en dar la vuelta a la Tierra, casi un mes en el calendario solar que usamos cotidianamente. Si empleáramos un calendario lunar, como el judío y el musulmán, la fase de la luna nos indicaría el día en que estamos. En el calendario lunar, el comienzo del mes suele ser la luna nueva, de modo tal que el 15 del mes es siempre luna llena. La pascua judía, por ejemplo, se celebra el 15 del mes de Nisán, o sea, en la primera luna llena después del comienzo de la primavera en el hemisferio norte (21 de marzo), y por lo tanto puede caer en marzo o en abril.

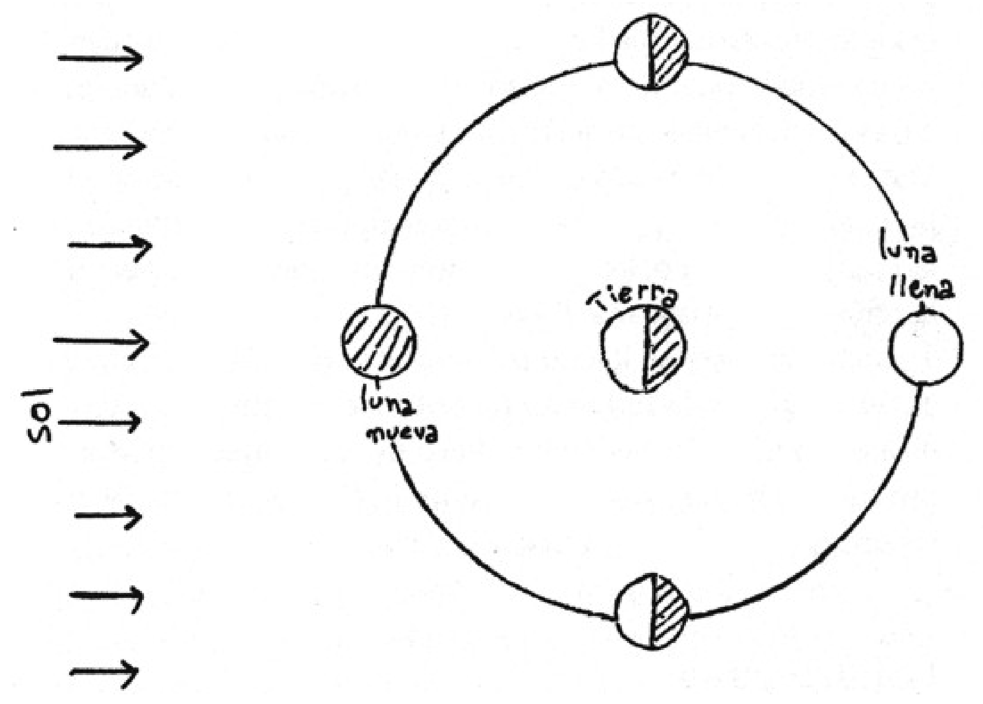


Figura 4. Formación de las fases de la luna

Como la luna no tiene luz propia, nosotros la vemos porque la ilumina el sol. La disposición sol-luna-Tierra va cambiando a lo largo de un mes, y eso es lo que nos hace ver fases: los rayos del sol iluminan la cara de la luna que le hace frente; si algunos de esos rayos se reflejan a nuestros ojos, vemos la luna. (Siempre que vemos algo es porque hay luz que llega a nuestros ojos desde ese algo.)

Cuando la luna está entre el sol y la Tierra, no la vemos porque ninguno de los rayos del sol que la iluminan se refleja hacia nosotros. Es la luna nueva. Cuando la luna se encuentra en el lado opuesto al del sol, vemos toda la cara iluminada, es decir, la mitad de la luna. Es lo que llamamos luna llena. Vemos la luna en cuarto creciente o menguante cuando el sol, la luna y nuestros ojos forman un ángulo recto. Pensando a la luna como una pelota, vemos sólo un cuarto de la pelota: la mitad de la mitad que ilumina el sol.

Si estas fases se llamaran cuartos porque lo que vemos es un cuarto de la luna entera, entonces la luna llena tendría el nombre de medialuna. Pero no, se llaman "cuartos" porque ocurren cuando la luna ha hecho un cuarto de su recorrido entre las fases nueva y llena.

Los eclipses

Podría parecer que la Tierra, cuando está entre la luna y el sol, impide que los rayos de éste lleguen a la luna, con lo cual tendríamos un eclipse de luna. Es decir, no veríamos nunca la luna llena porque estaría en la sombra de la Tierra.

También podría parecer que la luna, cuando está entre el sol y la Tierra, impide que los rayos de sol lleguen a la Tierra, con lo cual tendríamos un eclipse de sol.

Si es así: ¿por qué no hay eclipses todos los meses, cuando tenemos luna llena y cuando hay luna nueva? Porque para que ocurra un eclipse, el sol, la Tierra y la luna tienen que estar perfectamente alineados. Pero la luna, en su trayecto alrededor de nuestro planeta, no se mueve en el mismo plano que la Tierra alrededor del sol; más aún, otros factores (influencias gravitacionales de la Tierra y del sol, *elipsicidad* de la órbita terrestre) perturban el recorrido de la luna. Por eso los eclipses de sol y de luna no ocurren todos los meses, sino sólo cada tanto.

¿Cada cuánto? Es un poco complejo de determinar. En un año, el máximo son tres eclipses de luna, pero puede no haber ninguno; y puede haber entre dos y cinco eclipses de sol. Pero lo que ya habían descubierto los babilonios, mediante acumulación de observaciones, es que hay un ciclo de poco más de dieciocho años en el que la secuencia de los eclipses se repite.

La formación megalítica de Stonehenge en Inglaterra ha sido caracterizada como un observatorio lunar. Hay evidencia de un círculo de piedras que permite llevar la cuenta de los años cursados en el ciclo de eclipses. Y hay alineamientos de piedras que indican los lugares en el horizonte en que se levanta la luna en distintas épocas. Estos datos parecen haber servido a los constructores del sitio para predecir aproximadamente los eclipses, aunque no supieran a qué se debía la repetición de los eventos cada dieciocho años.

El tamaño aparente del sol y de la luna

Vamos a medir el tamaño del sol y de la luna en el cielo, tal como los vemos nosotros, usando nuestro patrón de medidas: el puño. Pero antes de hacerlo, apostemos cuál será la magnitud de cada uno: ¿un puño? ¿Dos puños? ¿Medio puño? ¿Dos dedos? ¿Un dedo? Para medir el sol, *NO DEBEMOS MIRARLO DIRECTAMENTE*, sino realizar una medición vertiginosa: a la mañana, cuando sale, o a la tarde, cuando se pone.

Tanto el sol como la luna abarcan medio grado (el ancho de un meñique, con el brazo estirado, basta para cubrirlos). Sorprende que sean tan pequeños pero, sobre todo, que tengan igual tamaño angular. Da la casualidad de que la distancia equipara el tamaño: el sol es cuatrocientas veces más grande (en diámetro) que la luna. Pero está también cuatrocientas veces más lejos de nosotros que la luna. Esta circunstancia fortuita se aprecia cuando hay eclipse total del sol y se ve su corona haciéndole marco al centro oculto por la luna.

Capítulo 3
Febo asoma

De puntos cardinales, equinoccios y solsticios

Febo asoma. ¿Dónde? ¿En el este? Cuando yo era muy pequeña, en mi aula en el colegio había un cartel que decía "Este" sobre la puerta de entrada, y otro que decía "Oeste" sobre la ventana. Entonces, cuando entraba en una habitación con dos puertas o sin ventanas, me desorientaba: ¿cuál es el este? ¿No hay aquí oeste?

El asunto, claro está, es a la inversa: no es que el sol salga en el este, sino que llamamos "este" al lugar donde sale el sol... pero solamente el 21 de marzo y el 23 de septiembre. A esas dos fechas les llamamos equinoccios porque son los dos momentos en que la duración del día y de la noche son iguales ("*equi*"). ¿Y el resto del año? ¿El sol sale y se pone siempre en el mismo lugar?

> *Para contestar esta pregunta, elijamos un lugar para pararnos y un punto de referencia que nos permita ubicar el lugar en el horizonte donde se vea el sol cuando sale (o donde se vea cuando se pone). Hagamos un dibujo que muestre donde sale (o se pone) el sol respecto del punto de referencia elegido. Parándonos siempre en el mismo lugar, repitamos esta observación a lo largo del año, digamos una vez por mes. Para cada observación marquemos la fecha y hagamos un dibujo que muestre la posición del sol en el horizonte y nuestro punto de referencia, tal como los vemos desde nuestro lugar de observación.*
>
> *El dibujo mirando el horizonte oriental sería algo así:*

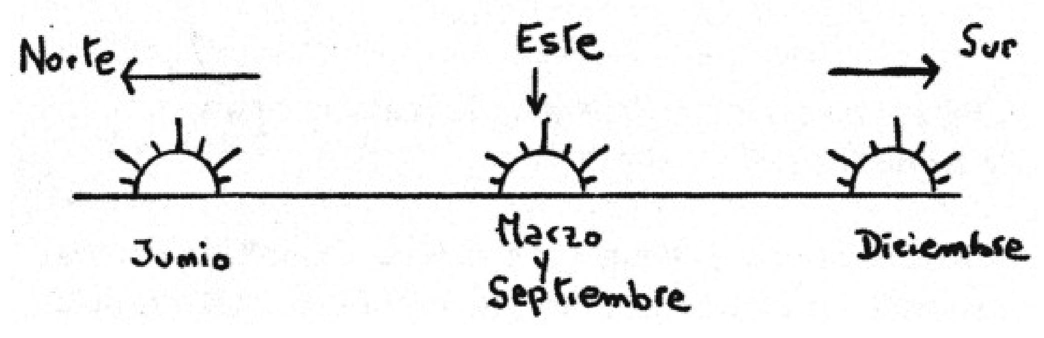


Figura 5. Amaneceres

A lo largo del año, el lugar en el horizonte en donde el sol sale (y se pone) va variando: más hacia el sur en diciembre, más hacia el norte en junio.

Las posiciones extremas del sol, al sur y al norte, ocurren respectivamente el 21 de diciembre y el 21 de junio. Estas dos fechas clave se llaman solsticios porque parece que el sol estuviera estacionario ("*sticio*") por varios días. En cambio, cerca de los equinoccios el sol cambia mucho de posición en el cielo de día en día. Comparando su movimiento con el de un péndulo, cerca de los equinoccios se mueve rápido como un péndulo en el centro de su oscilación, mientras que en los solsticios el sol disminuye su marcha, se detiene y retrocede, igual que el péndulo en los extremos de su recorrido.

Las estaciones

El solsticio de junio, cuando el sol sale y se pone más hacia el norte, marca el comienzo del verano en el hemisferio norte y del invierno en el hemisferio sur. A la inversa, el solsticio de diciembre indica el momento en que el sol sale y se pone más al sur y es el comienzo del verano austral y del invierno boreal.

Sabemos por experiencia propia que los días en invierno son cortos y las noches largas, y que en verano es al revés. O sea que al sol lo vemos menos tiempo transitando por el cielo durante los días de invierno que el resto del año. Entonces, el camino del sol es distinto en las distintas estaciones.

Sería bueno poder dibujar ese camino variable del sol en el cielo. Pero para eso, además de conocer las posiciones del sol en el horizonte, necesitamos saber dónde está al mediodía.

El sol y lo que cuentan sus sombras

A veces sigo a mi sombra,
A veces viene detrás.
Vidala del Norte de la Argentina

Ya que al sol no hay que mirarlo en forma directa por el peligro de arruinarnos la vista, recurriremos a las sombras, que nos darán información indirecta sobre la posición del sol en el cielo.

Lo que sabemos y lo que queremos saber ahora es esto: desde que sale hasta que se pone, el sol transita por nuestro cielo describiendo un arco; ¿ese arco pasará en algún momento justo sobre nuestras cabezas?

Si el sol estuviera exactamente sobre nuestra cabeza -este punto en el cielo se llama el "cenit"- ni nosotros ni un palo vertical tendrían sombra.

> *Para comprobar si esto sucede, basta con plantar un palo en el suelo, que esté bien vertical (empleando una escuadra o una plomada es posible verificar la verticalidad). Ahora podemos trazar la sombra del palo y seguir la evolución de la sombra a lo largo del día. Podemos también determinar el momento en que la sombra desaparece o se acorta al máximo antes de empezar a alargarse de nuevo: ése será el momento en que el sol está en su punto más alto.*

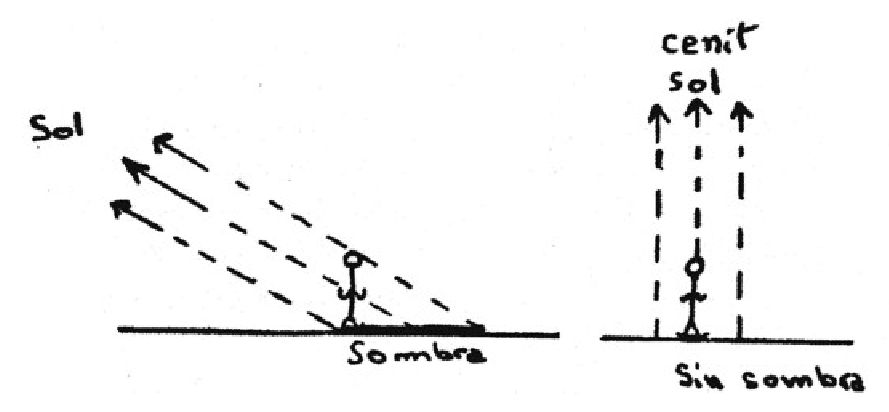


Figura 6. Sombras nada más

El sol está en su punto más alto en el cielo cuando atraviesa el meridiano a mediodía. (El meridiano es una línea imaginaria que va del sur al norte pasando por el cenit y se usa para determinar la hora local a partir del origen, arbitrario pero convencional, en el meridiano de Greenwich cerca de Londres.) Si el punto más alto es el cenit, justo sobre nuestra cabeza, no echaremos sombra. De lo contrario, tendremos sombra aun a mediodía.

¿Y esto de qué depende? Depende de donde estemos en el globo terráqueo y depende de la época del año. En España nunca estaremos sin sombra. En la Argentina, solamente lo lograremos en el norte de Jujuy y de Salta, y en un pequeño sector de Formosa. En Bolivia y Perú, sólo en el verano.

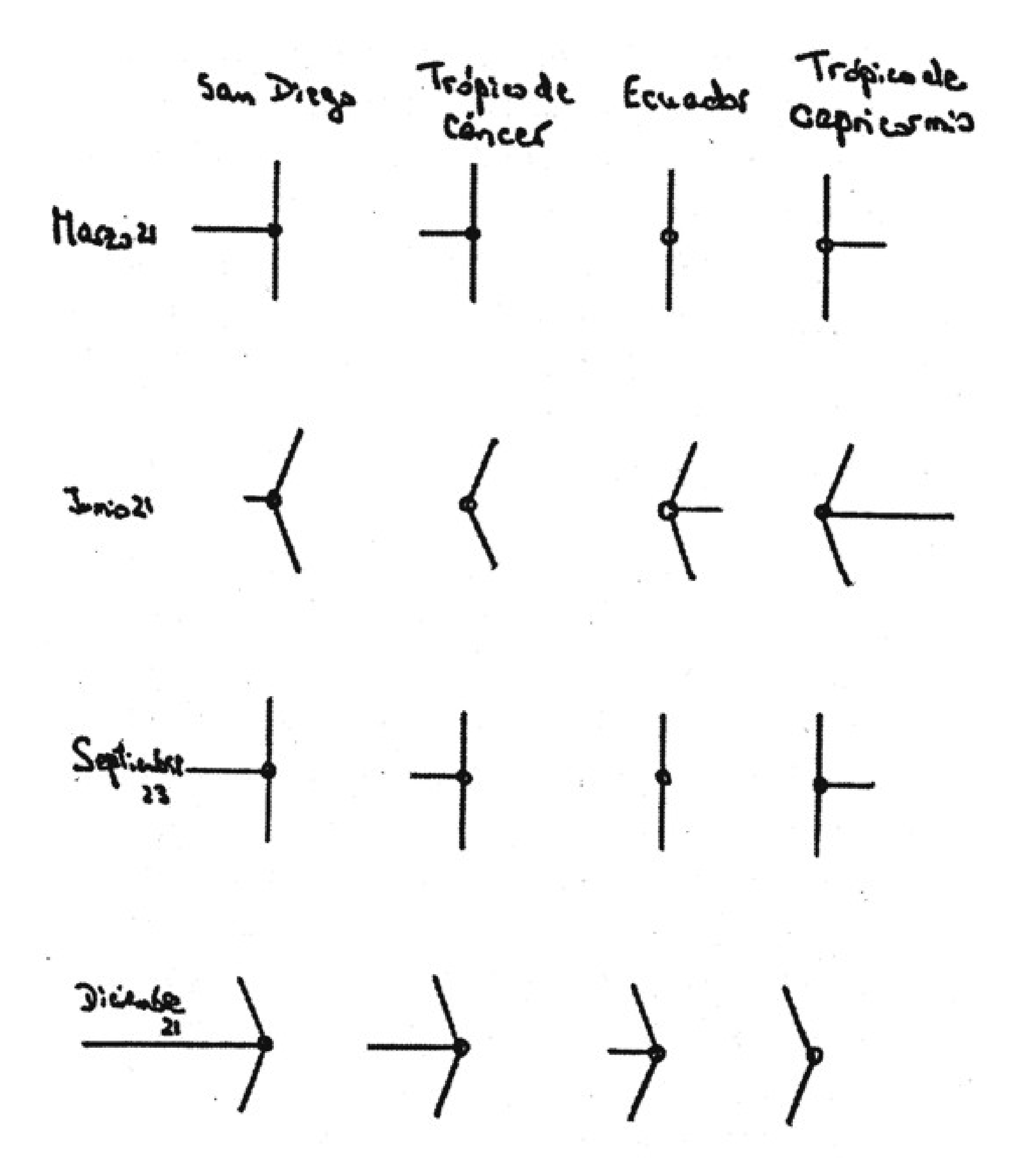


Figura 7. Sombras de un palo vertical, trazadas en el suelo, en tres momentos del día (amanecer, mediodía y puesta del sol). El punto cardinal norte queda a la izquierda del diagrama.

Los lugares del globo en donde el sol está en el cenit a mediodía en el solsticio del 21 de diciembre determinan la latitud del Trópico de Capricornio (23,5° sur). Correlativamente, los lugares del globo donde el 21 de junio el sol está en el cenit a mediodía y la gente no tiene sombra determinan el paralelo que llamamos Trópico de Cáncer (23,5° norte). Evidentemente, si el sol no transitara de sur a norte ida y vuelta respecto de la Tierra, no tendríamos estaciones. El sol saldría siempre en el

este y se pondría siempre en el oeste, y los Trópicos de Cáncer y de Capricornio no denotarían latitudes especiales

Supongamos que una persona está en Buenos Aires y tiene cuatro amigos estratégicamente ubicados: uno sobre el Trópico de Capricornio (Brasil), otro en el Ecuador (podría ser en Kenia), otro en el Trópico de Cáncer (por ejemplo en México) y yo, que estoy en San Diego, California (latitud norte aproximadamente igual a la de Buenos Aires en el sur). Cada uno entierra un palo vertical (todos del mismo largo) y dibuja en el suelo las sombras al amanecer, cuan do el sol se encuentra en su punto más alto y cuando está por ponerse. Veamos lo que nos dicen las sombras en cuatro fechas significativas, astronómicamente hablando. En la figura 7, el círculo marca la inserción del palo vertical y los puntos cardinales están ubicados con el norte a la izquierda y el este arriba.

Se desprende de lo anterior que las sombras de un palo vertical sirven de reloj local. Pero estos "relojes de sombras del sol" son de uso restringido a la localidad en que se construyen y calibran. Resulta que se obtienen relojes más útiles y fáciles de construir y leer si en vez de un palo vertical se usa un palo señalador (al que se denomina "gnomon") inclinado de modo que forme con la vertical el ángulo de la latitud del lugar donde estamos. Con el gnomon ajustado en esta forma, las horas quedan marcadas simplemente como líneas rectas equidistantes cuya longitud y dirección dan la hora a lo largo del año en cualquier localidad. Hay diversos tipos de relojes de sol en los jardines del mundo, algunos con diales de líneas horarias paralelas, otros con líneas horarias radiales, según se haya elegido el plano en el que se proyectan las sombras del gnomon. Pero el principio básico es siempre el mismo.

La longitud de la sombra de un palo vertical era utilizada por los egipcios para medir tiempos. Relojes de sol con el gnomon inclinado a la latitud del lugar de uso recién aparecen en Asia Menor en la época de las Cruzadas. Cuando se vuelven populares en Europa, ya han aparecido los primeros relojes mecánicos.

El recorrido del sol en el cielo

Si juntamos todo lo que hemos determinado hasta acá sobre el movimiento del sol visto desde Buenos Aires, terminamos con un dibujo así:

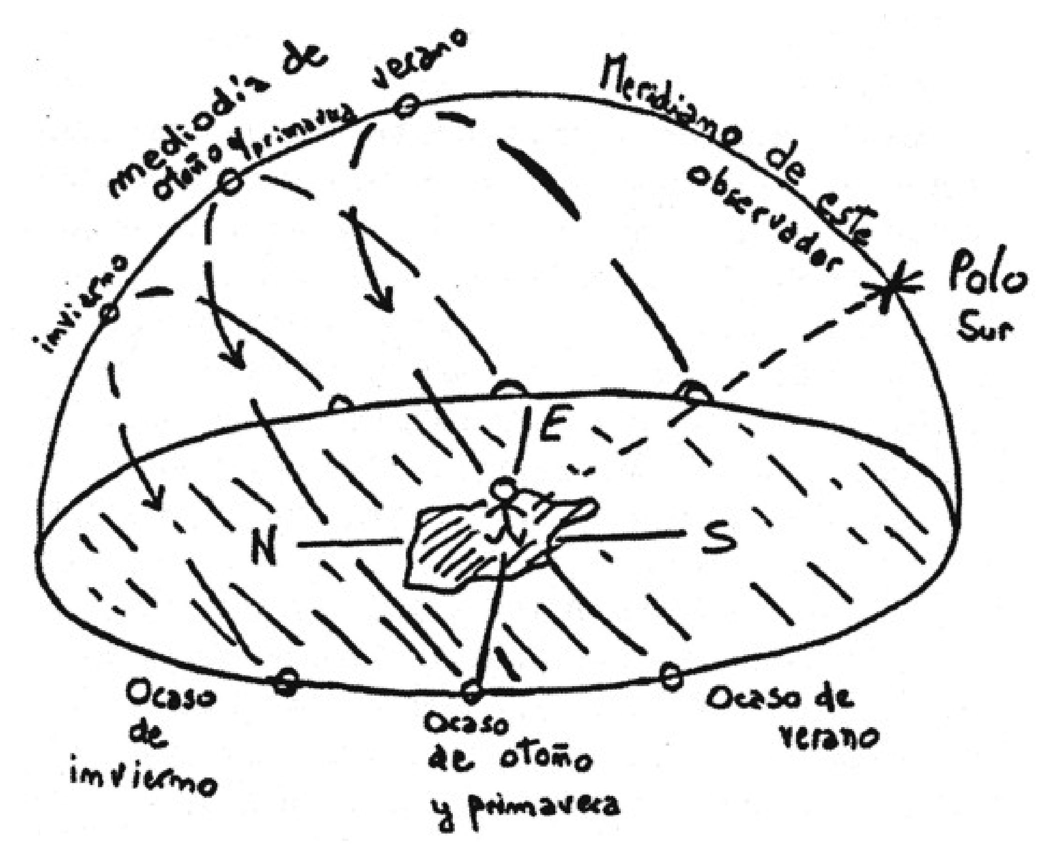


Figura 8. Recorrido del sol visto desde Buenos Aires

Este dibujo incorpora los resultados de las observaciones presentados en las figuras 5 y 7, y nos permite advertir claramente los cambios en el recorrido del sol a lo largo del año.

Calendarios y monumentos

Como acabamos de ver, el sol sirve para medir tiempos. Así, en la Antigüedad, cuando no había relojes ni calendarios como los que tenemos ahora, un día era el lapso transcurrido entre dos pasajes sucesivos del sol por el meridiano, o sea, de un mediodía al mediodía siguiente. O de un amanecer (o puesta del sol) al amanecer (o puesta) siguiente. Una hora es ese lapso dividido por veinticuatro[5]. Un mes era el

---

[5] 5 La división del día en veinticuatro horas de igual duración es bastante tardía; data de la Edad Media. La elección del número 24, aparentemente arbitrario, tiene sus orígenes en el uso del sistema sexagesimal, que viene de la cultura babilónica. El empleo de este sistema se supone que fue impulsado, entre otras cosas, porque el número 60 tiene muchos factores, entre ellos, 12, 24 y 30 (hecho que simplifica las divisiones y multiplicaciones) y además el año tiene aproximadamente trescientos sesenta días que los babilonios dividían en doce meses de treinta días. De

tiempo entre una luna nueva y la siguiente. Y un año era el lapso entre dos amaneceres (o puestas de sol) extremos en el horizonte, uno al norte y uno al sur, o entre dos alturas extremas, máxima y mínima, del sol a mediodía.

Para llevar la cuenta de tiempos transcurridos basados en los movimientos de los astros, era importante realizar observaciones y documentarlas. En este sentido, los estudios realizados por científicos-arqueólogos sobre las orientaciones de los monumentos antiguos son sumamente interesantes. Aunque algunos historiadores se mofen de los resultados de estas investigaciones, hay que decir que las conclusiones y las evidencias citadas por los científicos-arqueólogos son muy atrayentes. Veamos algunas de ellas.

Muchos de los templos de Egipto están orientados hacia los solsticios[6]. Algunos, como el gran templo de Amen-Ra en Karnak, antigua Tebas, miran hacia el solsticio de verano, al amanecer. También los hay que miran al solsticio de verano a la puesta del sol, o al solsticio de invierno cuando el sol sale o cuando se pone. El solsticio de verano era particularmente importante en Egipto, ya que señalaba el comienzo de las inundaciones del Nilo, época clave para la siembra y la cosecha. Por lo tanto, se puede decir que los templos solsticiales servían de observatorios para predecir los momentos importantes del año. Resulta que las pirámides de Sakkhara y de Giza, que son mucho más antiguas (de hace seis mil años) que los templos egipcios (de hace tres mil años), están orientadas preferentemente hacia la salida o la puesta del sol durante los equinoccios. Así también están orientados los restos de los templos en Baalbeck, Palmyra y Jerusalén, que se encuentran al norte de Egipto camino a la Mesopotamia. La explicación de los templos equinocciales sería que fueron erigidos bajo la influencia de las civilizaciones de Babilonia. En la Mesopotamia, el momento importante durante el año era el de las inundaciones del Tigris y el Éufrates y éstas, a diferencia de las del Nilo, ocurrían en la época del equinoccio de primavera.

---

ahí también la idea de dividir el círculo que describe el sol en el cielo -y por ende, todos los círculos- en trescientos sesenta grados. Y el grado en sesenta partes o "minucias primas" (de ahí nuestra palabra "minutos"), y estas partes a su vez en "minucias segundas" (de ahí nuestros "segundos"). ¿Por qué usamos la misma nomenclatura para las partes del ángulo y del tiempo? Esto lo veremos en el próximo capítulo.

[6] Hemos denominado solsticios y equinoccios a ciertas fechas, momentos en el tiempo, en que el sol está en lugares específicos en el cielo. Los términos también se usan para denotar los lugares en el cielo o sobre el horizonte en que se encuentra el sol en esas fechas.

También en Inglaterra los habitantes de hace dos mil años hicieron grandes construcciones con enormes rocas, que se supone actuaban como calendarios. Así, los círculos de piedras de Stonehenge se han interpretado como un templo solsticial. Hay una roca, llamada El Talón, que indica con total precisión el lugar en que aparece el sol durante el solsticio de junio. Los estudios detallados de ese sitio indican cómo podría haber sido, además, un monumento que predijera los eclipses lunares.

La reproducibilidad de los fenómenos astronómicos tiene un impacto especial. Por ejemplo, a la vuelta de mi casa en San Diego (California), el arquitecto del Instituto Salk (Louis Kahn) configuró el edificio de tal modo que una fuente con su acueducto de desagüe hacia el mar señala la dirección precisa en que se pone el sol en los equinoccios. Es una cita infaltable: año tras año los devotos (del sol y de la arquitectura) se congregan para presenciar el espectáculo y verificar que se cumple sin desviación.

Hay otros monumentos erigidos hacia estrellas o planetas importantes en diversas culturas, como Sirio para los egipcios y Venus para los mayas. Hablaremos de esto más adelante.

Capítulo 4
En el cielo, las estrellas

Constelaciones

Los pueblos de la Antigüedad conocían muy bien la posición de las estrellas en el cielo. Sin muchas distracciones nocturnas y, sobre todo, sin enormes ciudades con rascacielos y luces artificiales que impidieran ver el cielo, tenían múltiples oportunidades para mirar, observar y fantasear.

Para orientarse en el cielo, o quizá para dedicar alguna porción del campo estrellado a cada dios propiciador, parece que todos los pueblos antiguos agrupaban las estrellas en conjuntos que llamamos constelaciones. Cada cultura trazó las formas o figuras imaginarias de las constelaciones según sus propias creencias y necesidades. Así es que podemos organizar el cielo según las constelaciones de los indígenas de las Américas o según las constelaciones mitológicas de los griegos, o las de los chinos. Como es costumbre en nuestra cultura, emplearemos las constelaciones de los griegos (que son las mismas que las de los romanos)[7].

En un cielo negro y despejado, a simple vista se pueden ver unas dos mil estrellas. Al agruparlas en constelaciones (porque por suerte no cambian su ubicación relativa de noche en noche, así que los dibujos se mantienen constantes), se simplifica mucho la tarea de identificar tantas estrellas y empezamos a navegar el cielo nocturno. Los dibujos de las constelaciones que se ven en los libros suelen tener algunos problemas. El primero es que no es tan sencillo identificar un grupo de estrellas con algunas de las constelaciones. En las representaciones más viejas, las figuras alegóricas (la ballena, el águila, la reina Casiopea) son difíciles de identificar en el cielo porque no hay una relación directa y evidente entre la figura y las estrellas involucradas. Tanto es así que hay quienes suponen que lo que se hacía antiguamente (y esto incluye a los griegos) era dedicar cierta porción del cielo a dioses o figuras mitológicas sin siquiera tentar una identificación concreta con el grupo de estrellas. En los libros más modernos las figuras son geométricas y pasan

---

[7] Pese a que los pueblos nativos de Sudamérica, como los mocovíes, también tenían una muy rica astronomía e imaginaban constelaciones de acuerdo con animales y dioses locales.

por todas las estrellas involucradas, pero de manera aparentemente arbitraria, y no se reconoce la forma o el personaje que da el nombre a la constelación. El segundo problema es que las figuras atribuidas a las constelaciones fueron designadas hace miles de años por gente de las civilizaciones de entonces, todas en el hemisferio norte. Así que cuando miramos el cielo en el hemisferio sur, ¡resulta que las supuestas figuras quedan patas arriba! Y como la mayoría de los textos provienen del hemisferio norte, los libros suelen mostrar todo desde ese punto de vista.

Veamos cómo resolver estos pequeños problemas. El primero fue resuelto en forma ingeniosa por H. A. Rey[8] en su libro Las estrellas. Rey simplemente buscó la manera de unir las estrellas de modo que formaran la figura indicada por el nombre de la constelación. Es un método que consiste en unir los puntos numerados para formar una figura, como esos juegos para niños del diario del domingo. En cuanto al segundo problema, nosotros lo resolveremos mostrando los dibujos de las constelaciones como se ven en el cielo del sur. Y que sean los del norte los que dan vuelta la hoja o el pescuezo para verlos patas para abajo.

Tomemos como ejemplo Orión, la constelación que tiene más estrellas brillantes[9]. La podemos ubicar fácilmente por su cinturón formado por tres estrellas que se conocen también como las Tres Marías. Orión es un cazador y tiene un brazo levantado que blande un garrote, un escudo en su otra mano, y una espada colgando de su cinto. Uno de sus pies es una estrella de luz azulada, y el hombro del brazo que sostiene el garrote es una estrella de luz rojiza.

La estrella más brillante del cielo, Sirio, pertenece al Perro Grande, o Gran Can. El perro lo sigue a Orión el cazador, y se encuentra fácilmente porque Sirio está alineada con las Tres Marías.

Visto desde Buenos Aires, lo que se ve en el cielo es algo así:

---

[8] Astrónomo y autor de unos libros bellísimos para niños cuyo protagonista es un tal Jorge Curioso.

[9] En todos los dibujos con estrellas, las más brillantes se denotan con un redondel rodeado del símbolo usual con puntas. Las demás se marcan con puntos redondos más o menos grandes según su brillo.

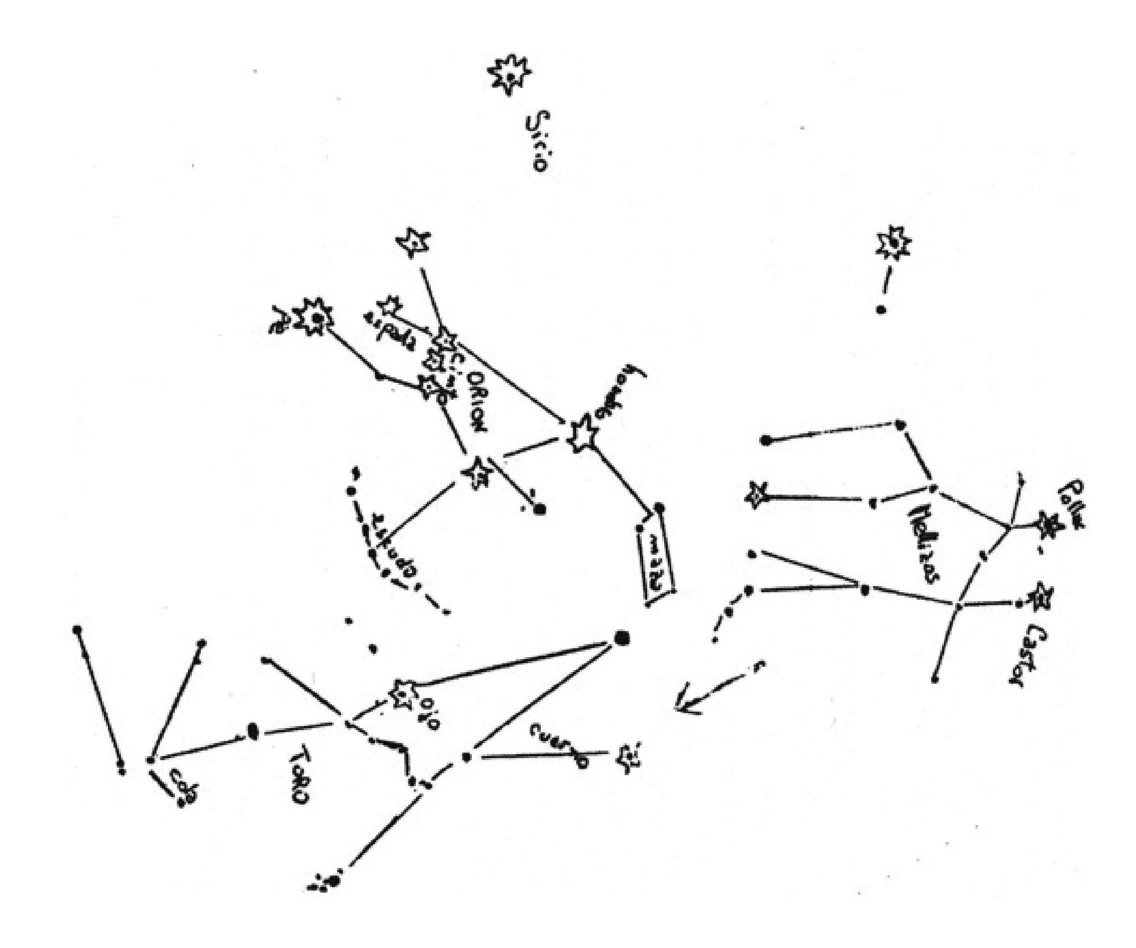


Figura 9. Pero ¿cómo sabemos cuándo hay que mirar para verlo a Orión?

El zodíaco

Como se observa en la figura, Orión aparece en el cielo flanqueado por las constelaciones de los Mellizos y el Toro. Éstas forman parte de la banda de constelaciones que se ven más o menos a lo largo del camino que recorren la luna y el sol en el cielo (la eclíptica). En esta banda distinguimos doce constelaciones, que conjuntamente reciben el nombre de "zodíaco". La palabra tiene el mismo origen que zoológico. "Zoo", en griego, quiere decir "animal" y, en efecto, la mayoría de las doce constelaciones son animales. En el orden en que van apareciendo en el cielo, son: el Aguatero (Acuario), los Peces (Piscis), el Carnero (Aries), el Toro (Taurus), los Mellizos (Gemini), el Cangrejo (Cáncer), el León (Leo), la Virgen (Virgo), la Balanza (Libra), el Escorpión (Scorpio), el Arquero (Sagitario), la Cabra (Capricornio).

Algunas de estas constelaciones, como los Mellizos y el Toro, son mucho más fáciles de identificar que otras. Estas dos son contiguas y pueden ser vistas en las primeras

horas de la noche en febrero-marzo (o antes del amanecer en octubre-noviembre). Orión no pertenece al zodíaco pero aparece siempre junto con el Toro y los Mellizos, un poco más arriba (o más abajo, en el hemisferio norte).

También es útil reconocer al Escorpión y el Arquero, que aparecen uno al lado del otro en las primeras horas de la noche en agosto-septiembre (o antes del amanecer en abril-mayo). Así logramos puntos de referencia en el cielo en distintas épocas y a distintas horas.

En cualquier noche es posible ver la mayoría de las constelaciones del zodíaco, siempre que uno esté dispuesto a mirar toda la noche hasta cerca del amanecer. La única parte del zodíaco que seguramente no se podrá ver es la zona donde se encuentra nuestra estrella personal, el sol, porque su luz lo va a impedir. (Dicho de otro modo: durante el día, mientras vemos al sol porque está sobre nuestro horizonte, no podemos ver las estrellas. Desde que el sol se pone hasta que amanece es cuando vemos el cielo estrellado. Las estrellas zodiacales que están sobre nuestro horizonte justo antes del amanecer son las qué no veíamos en el cielo apenas puesto el sol.)

La parte del zodíaco que no se puede ver varía a lo largo del año, lo que equivale a decir que el sol se mueve entre las estrellas del zodíaco a lo largo del año. Cada signo (o constelación del zodíaco) corresponde a un mes (el mes en que no se ve, a causa del brillo del sol): por ejemplo, en abril, el sol está entre las estrellas del Carnero (Aries), en mayo está entre las del Toro (Tauro), y así sucesivamente. El camino del sol entre las estrellas es una especie de carretera real en el cielo, por la que (o cerca de la cual) circulan también los otros astros de nuestro sistema solar. Como dijimos, tiene su nombre propio: se la llama la "eclíptica".

Es interesante, como veremos más adelante, comprobar que todo esto ha cambiado a lo largo de los siglos. *¿Quo vadis*, estrellita?

Para ver bien el cielo de noche es necesario estar en un lugar en donde se vean los horizontes y un cielo negro cuajado de estrellas. En la ciudad, llena de edificios y de luces, es difícil: habrá que aprovechar alguna salida al campo, a la playa o las montañas.

Hasta aquí sabemos que el sol se mueve entre las estrellas' a lo largo del año. O, lo que es lo mismo, las estrellas se mueven con respecto al sol[10]. Para constatar cuánto y cómo se mueven, vamos a usar una estrella de la zona del zodíaco. Hagamos el mismo tipo de observación que llevamos a cabo con la luna: marquemos el lugar en que nos ubicamos y usemos un punto de referencia a nuestro alrededor (un poste, un árbol) para ubicar la estrella en el cielo, y volvamos al mismo lugar después de una hora. La estrella se movió. ¿Cuánto y cómo? Se puede usar el puño calibrado para medir el movimiento.

Si en vez de una estrella de verdad usamos una "estrella vagabunda", como llamaban los antiguos a los planetas, no importa. Todos los objetos luminosos en el cielo (luna, sol, estrellas, planetas) se mueven más o menos igual (unos quince grados de este a oeste) en el espacio de una hora.

Ahora podemos hacer la otra medición, volviendo a la misma hora al mismo lugar pero un día (o, mejor, varios días) después. Aquí sí importa elegir una estrella zodiacal. Efectivamente, en veinticuatro horas la estrella se movió, pero en sentido contrario al movimiento de la luna en un día. ¡Las cosas se están complicando! Pero no es para tanto, una vez que pongamos todas las observaciones juntas van a cobrar mayor sentido.

¿Cuántos grados se desplaza la estrella? Las estrellas se mueven un grado hacia el oeste en un día. Por lo tanto, los "más o menos quince grados en una hora" son apenas un poco más de quince grados. En el caso de la luna, recordemos, esos "más o menos quince grados en una hora" son, en realidad, doce grados y medio; es decir, un poco menos. Dicho de otra forma: la luna se levanta (y se pone) casi una hora más tarde de día en día. Y las estrellas, cada día que pasa se levantan y se ponen cuatro minutos más temprano." Cuatro minutos es poca cosa, es cierto. Pero con el correr de los días se van acumulando y al cabo de un mes (treinta días) se ponen dos horas más temprano, y así sucesivamente.

Este movimiento diario de las estrellas está directamente relacionado con el curioso hecho de que las subdivisiones en minutos y segundos se usan tanto para medir

---

[10] En realidad, mirando el cielo sólo sabemos que hay un movimiento relativo entre el sol y las estrellas. Supongamos que el sol y las estrellas giran alrededor de la Tierra, que es lo que aparentemente sucede. Entonces, si miramos las estrellas siempre a la misma hora, que es cuando el sol está en el mismo lugar en su recorrido diario, observamos que las estrellas se van moviendo con el correr de los días. Si, en cambio, miramos el cielo siempre cuando una estrella está en el mismo lugar, observamos que esto va sucediendo a distintas horas.

tiempos como para medir ángulos. Los babilonios, parece, dividían el día en seis horas (en vez de las veinticuatro que usamos actualmente); así que para ellos, las estrellas se ponían un minuto más temprano cada seis horas o trescientos sesenta minutos de tiempo. Lo que equivale a decir que avanzaban un grado sobre los trescientos sesenta de su recorrido diario, que es lo mismo que un minuto cada seis grados o trescientos sesenta minutos de ángulo. Conceptualmente, entonces, había una correspondencia directa entre ángulos y tiempos que justificaba la nomenclatura.

No está de más recordar aquí que el enfoque propuesto consiste en juntar toda la evidencia disponible a simple vista, para entender con claridad cómo se desarrollan las teorías que explican los datos. Procedemos en forma netamente científica: estudiamos los fenómenos empíricos y luego vamos "inventando" explicaciones (o estudiamos las que se fueron dando a lo largo del tiempo), y nos abocamos a las más plausibles y fructíferas. O sea que nuestro objetivo por el momento es hacer acopio de datos. En el Capítulo 5 veremos las explicaciones que se han ido dando, a lo largo de los siglos, de estas observaciones.

Buscando el norte, buscando el sur

Ahora trabajaremos con las estrellas que están muy al norte y las que están muy al sur. Depende de la ubicación geográfica -la latitud- cuáles y cuántas se pueden ver.

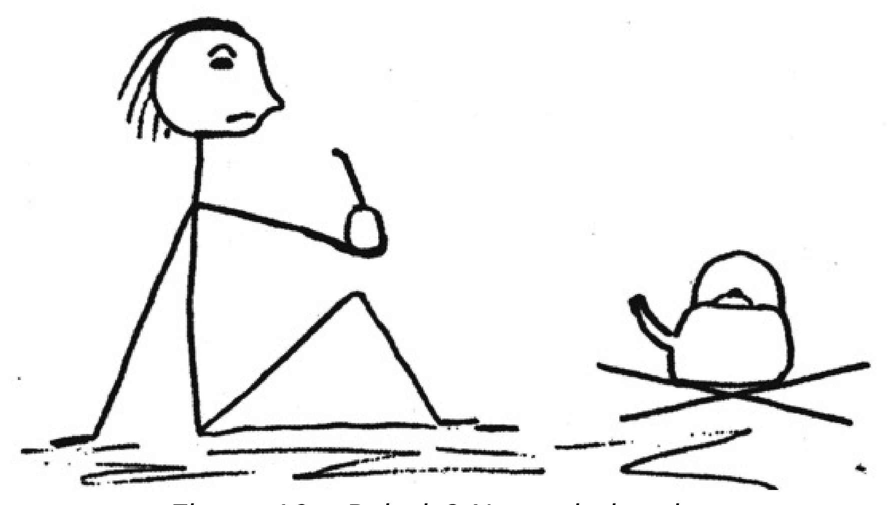


Figura 10. ¿Polaris? Nunca la he visto

En este caso, por simplicidad, empezamos con las constelaciones que giran alrededor de Polaris, la Estrella del Norte o estrella polar, la única que no se mueve de las que se ven en el cielo. No se mueve porque está, precisamente, sobre la prolongación del eje de rotación de la Tierra: el eje pasa por el polo norte geográfico y su prolongación define el polo norte celestial, marcado por Polaris. Hay que aclarar, que sólo es visible desde el hemisferio norte.

Polaris es una estrella famosa porque es el punto de referencia que se utilizaba antes de que hubiera brújulas, para ubicar los puntos cardinales y saber hacia dónde había que dirigirse[11]. El norte cardinal está donde una vertical desde Polaris corta el horizonte. Pero que sea famosa y útil no quiere decir que sea brillante. La forma de ubicar a Polaris no es por su brillo, sino porque hay otras estrellas en el cielo nórdico que apuntan a ella (estrellas indicadoras).

Ubiquemos dos de estas constelaciones circumpolares (que dan vueltas alrededor del polo): el Gran Oso y Casiopea. El Gran Oso es una constelación muy grande. Concentrémonos en la parte que tiene forma de un cucharón con mango.

---

[11] Estudios recientes de etnoastrónomos documentan que aún hoy hay pescadores en África que navegan usando a Polaris: como los afar de Eritrea que pescan en el Mar Rojo y los habitantes de las islas Kerkenna cerca de la costa mediterránea en Túnez.

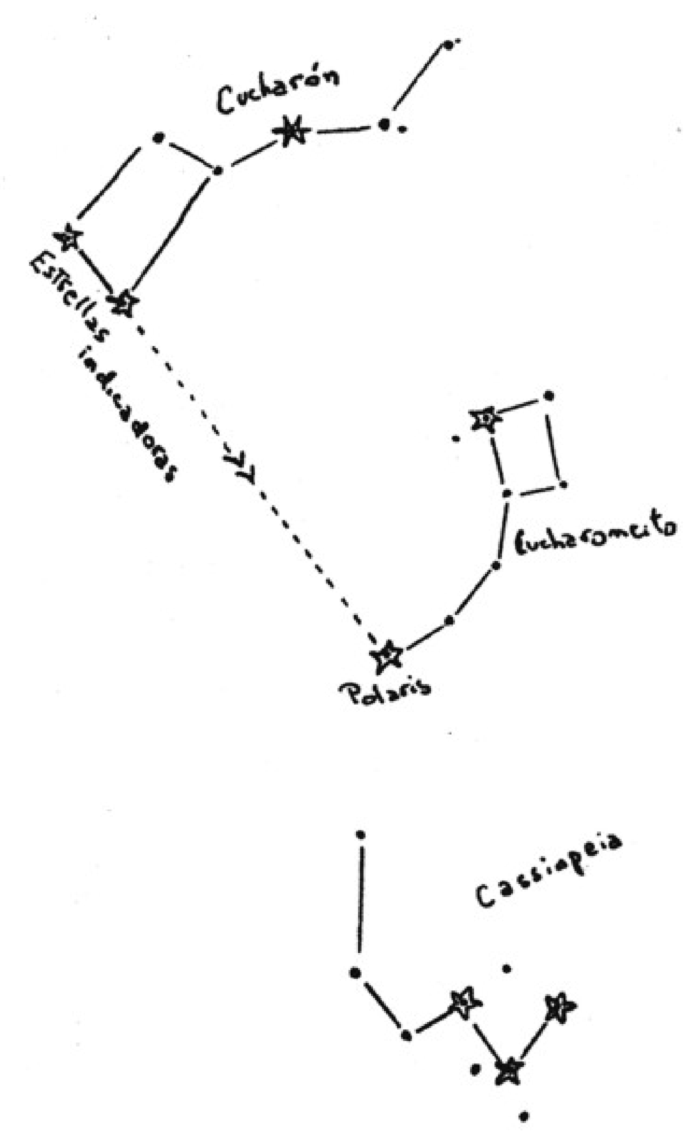


Figura 11. Polaris y las estrellas indicadoras

Las dos estrellas del extremo del cucharón determinan una línea que apunta hacia Polaris.

Polaris, a su vez, es la última estrella del mango de otra constelación en forma de pequeño cucharón. Estos dos cucharones no se confunden porque hay mucha diferencia de tamaño y de brillo entre ambos.

Del otro lado del Oso respecto de Polaris, está Casiopea, que tiene la forma de una W un poco deformada. En el hemisferio sur, del Trópico de Capricornio hacia el norte, se llega a ver Casiopea (en octubre-noviembre) y el Cucharón del Gran Oso (en abril-mayo).

En el hemisferio sur el eje de rotación de la Tierra pasa por el polo sur geográfico y su prolongación define el polo sur celestial. Sólo que allí no hay una estrella para marcarlo. Pero sí hay una constelación circumpolar fácil de reconocer, la Cruz del Sur, que nos ayuda a encontrar el polo[12]. Es útil pensar a la Cruz como si fuera una espada, con una empuñadura más corta que el filo. Si prolongamos cuatro veces y media el eje mayor de la Cruz continuando la punta del filo, llegamos al lugar en el cielo que corresponde al polo sur celestial (esto se puede ver en la figura 13). Desde allí es posible trazar una vertical hacia el horizonte para marcar el punto cardinal sur. Pero esto también cambia a través de los siglos, como veremos más abajo.

De calendarios y relojes: midiendo tiempos

Es muy útil familiarizarse con el movimiento de las constelaciones circumpolares porque, conociendo bien su trayectoria se las puede usar como reloj y también como calendario.

Para visualizar esto y fijar ideas, puede valer la pena fabricarse un paraguas con la constelación dibujada o pegada, como muestra el dibujo. Si empezamos con el paraguas dispuesto como en la imagen a la izquierda, en un día D a una hora H, entonces la rotación del paraguas indica cómo emplear las constelaciones como reloj y como calendario.

Aclaremos que otras constelaciones como las zodiacales o también las estrellas brillantes e incluso el sol, se pueden usar como calendario y reloj. Las estrellas circumpolares tienen la ventaja de que no desaparecen debajo del horizonte (no se ponen), siempre que el observador no esté demasiado cerca del ecuador. Para utilizar los astros como reloj nos basamos en que el sol y las estrellas recorren trescientos sesenta grados en un lapso de tiempo que dividimos en veinticuatro horas[13]. Y para emplearlos como calendario nos basamos en que el sol se desplaza lentamente (a razón de un grado por día) entre las estrellas y recorre trescientos sesenta grados en un lapso de tiempo que dividimos en doce meses.

---

[12] La Cruz del Sur es emblemática del hemisferio sur. Así es que, por ejemplo, forma parte de las banderas de Australia y de Nueva Zelanda. Por otro lado, hay un poema de Julio Cortázar, nostálgico del sur, que termina diciendo: "la Cruz del Sur, el mate amargo / y las voces de amigos, usándose con otros".

[13] Las estrellas tardan casi cuatro minutos menos que el sol, pero a los efectos del reloj celestial que proponemos, podemos despreciar esa diferencia.

Usando el Cucharón alrededor del polo norte o la Cruz del Sur alrededor del polo sur, la figura muestra cómo cada rotación de noventa grados corresponde al transcurso de seis horas en un día dado; o, mirando en días sucesivos a la misma hora, cada rotación de noventa grados de la constelación corresponde al transcurso de tres meses.

Reloj día D Calendario hora H	Hora H Día D	Hora H + 6 D + 3 meses	Hora H + 12 D + 6 meses	Hora H + 18 D + 9 meses
Hemisferio norte				
Hemisferio sur				

Figura 12
Usando las estrellas circumpolares como reloj y como calendario. Reloj: en un mismo día D, las estrellas giran noventa grados cada seis horas. Calendario: a lo largo del año, mirando el cielo siempre a la misma hora H, las estrellas giran noventa grados cada tres meses.

Cuando los tiempos son muy, muy largos

El zodíaco y los signos astrológicos. Se sabe que hace seis mil años los egipcios y los babilonios utilizaban zodíacos de seis constelaciones. Se cree que las doce constelaciones que utilizamos ahora se usan desde la época del faraón Ramsés II, hace aproximadamente tres mil años. En ese entonces, el año empezaba cuando llegaba la primavera (al hemisferio norte), que era cuando el sol estaba en Aries. De ahí que quienes se interesan en astrología y horóscopos, y conocen bien la relación entre fechas y signos zodiacales dicen, por ejemplo, que "ser un Aries" significa haber nacido entre el 15 de marzo y el 15 de abril.

Esta antigua relación entre el signo del zodíaco y el comienzo de la primavera se refleja en el signo de Aries, el Carnero, ya que en la primavera los primeros animales en parir son las ovejas. Después de las ovejas vienen los terneros; así, el Toro es la constelación que sigue. Luego llega la época de los chivitos que, en

alguna época lejana, eran la representación de los Mellizos. El sol estaba en Cáncer y Capricornio al comienzo del verano y del invierno boreal, respectivamente. De ahí que esas dos constelaciones den sus nombres a los Trópicos, las latitudes donde el sol estaba en el cenit en esas fechas.

Pero si bien hace tres mil años ese era el recorrido del sol, actualmente en el equinoccio de primavera boreal (21 de marzo en nuestro calendario) el sol no está más en Aries: está saliendo de Piscis, moviéndose inexorablemente hacia Acuario (de ahí la canción de la obra musical Hair de esos años setenta en que renacía con furia la astrología, que dice que "estamos comenzando la era de Acuario"). En efecto, la equiparación de nuestro calendario con los signos astrológicos está desplazada un mes y medio. Y en sentido opuesto al camino que recorre el sol de mes en mes. ¿Cómo se explica eso?

Resulta que esta Tierra nuestra no gira simplemente alrededor de un eje estático, sino que ese eje de rotación efectúa un movimiento a su vez girando en un cono, como un trompo alrededor de la vertical. A ese movimiento se le dice "la precesión de los equinoccios" (lo de precesión viene de que el sol se va moviendo hacia la constelación "precedente" de su circuito anual). El eje terráqueo tarda 25.600 años en realizar una vuelta entera. Así que hace 6.400 años el sol estaba desfasado tres constelaciones respecto de donde está ahora. En otras palabras, los solsticios de ahora eran los equinoccios de entonces. Por lo tanto, los Mellizos (Gemini) eran el signo del equinoccio y simbolizaban, se supone, la igualdad del día y de la noche. En los años transcurridos, los Mellizos se han desplazado respecto del sol hasta quedar como signos del solsticio de junio.

¿A qué se debe este tránsito lento, sobrepuesto a la trayectoria anual, del sol entre las constelaciones? Así como la precesión de un trompo[14] se debe a la atracción gravitacional de la Tierra sobre su forma asimétrica, la precesión del eje de rotación terrestre se debe a la atracción gravitacional del sol y la luna sobre la forma de la Tierra, abultada en el ecuador y achatada en los polos.

Los polos terrestres no estuvieron ni estarán siempre en el mismo lugar. Al cambiar la orientación del eje de los polos terrestres, cambia el lugar hacia donde

[14] Su movimiento en espiral.

apunta este eje en la esfera celeste. Hace cuatro mil años, cuando los egipcios estaban construyendo sus monumentos, el polo norte estaba marcado no por Polaris sino por una de las estrellas de la constelación del Dragón; esto tiene que ser tomado en cuenta para la determinación de los puntos cardinales en ese entonces y, por lo tanto, para llegar a conclusiones sobre las alineaciones de los monumentos.

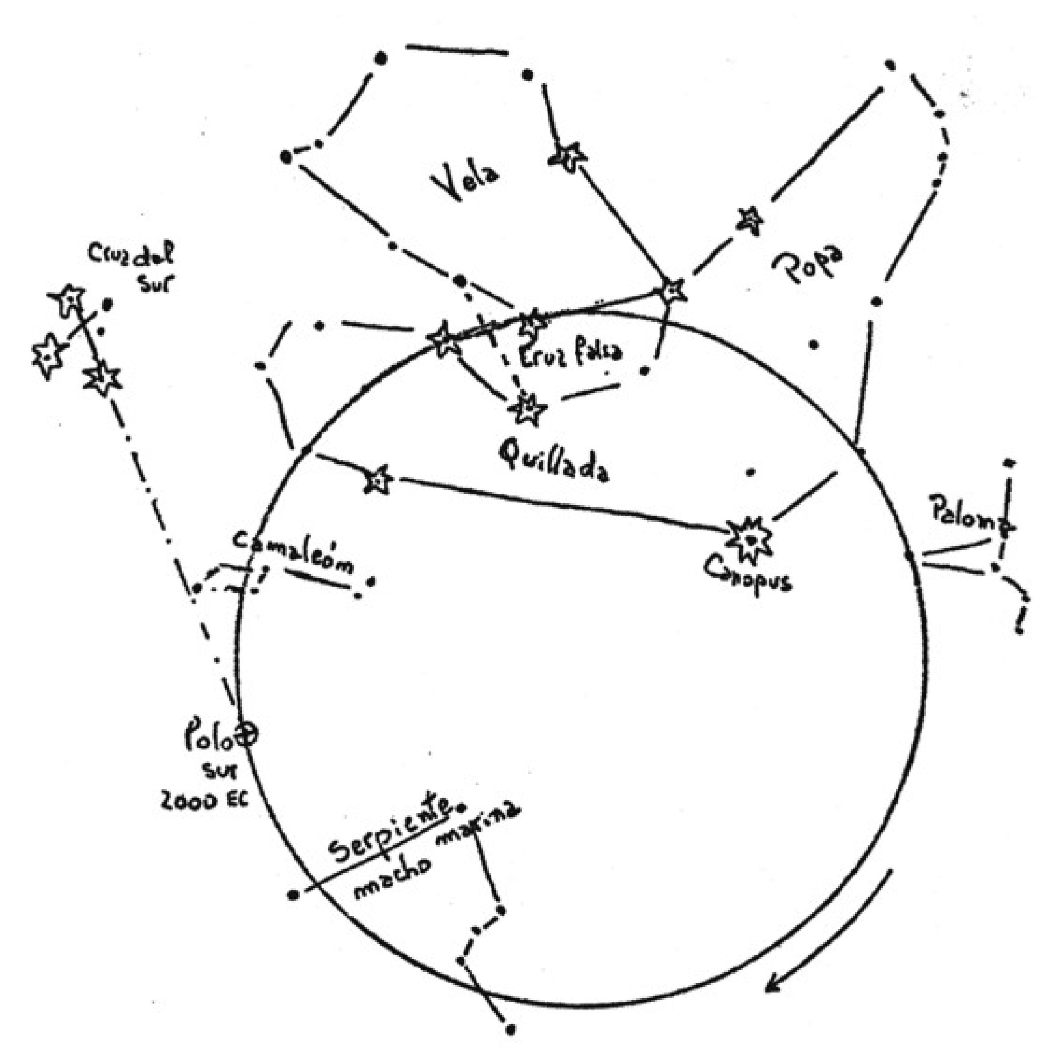


Figura 13. Recorrido del polo sur celestial debido a la precesión de los equinoccios: una revolución en veintiséis mil años

Dentro de cinco mil años la estrella polar será una estrella de la constelación Cefeo. Y dentro de veintiséis mil años volverá a ser Polaris. En el medio, donde no hay estrellas fácilmente visibles para marcar la posición del polo celestial norte, habrá

que ingeniarse y encontrar constelaciones visibles desde las que se pueda ubicar el polo mediante alguna construcción imaginaria (como la que se hace hoy para encontrar el polo sur a partir de la Cruz del Sur).

Simultáneamente con el polo norte, el polo sur también describe un círculo: va pasando por las constelaciones del Camaleón y la Vela del Argonauta sin coincidir con estrellas bien visibles hasta dentro de trece mil años, cuando el polo coincidirá con una de las estrellas de la Paloma. Entonces el hemisferio sur tendrá su propia Estrella Polar, que es la misma que tuvo trece mil años atrás.

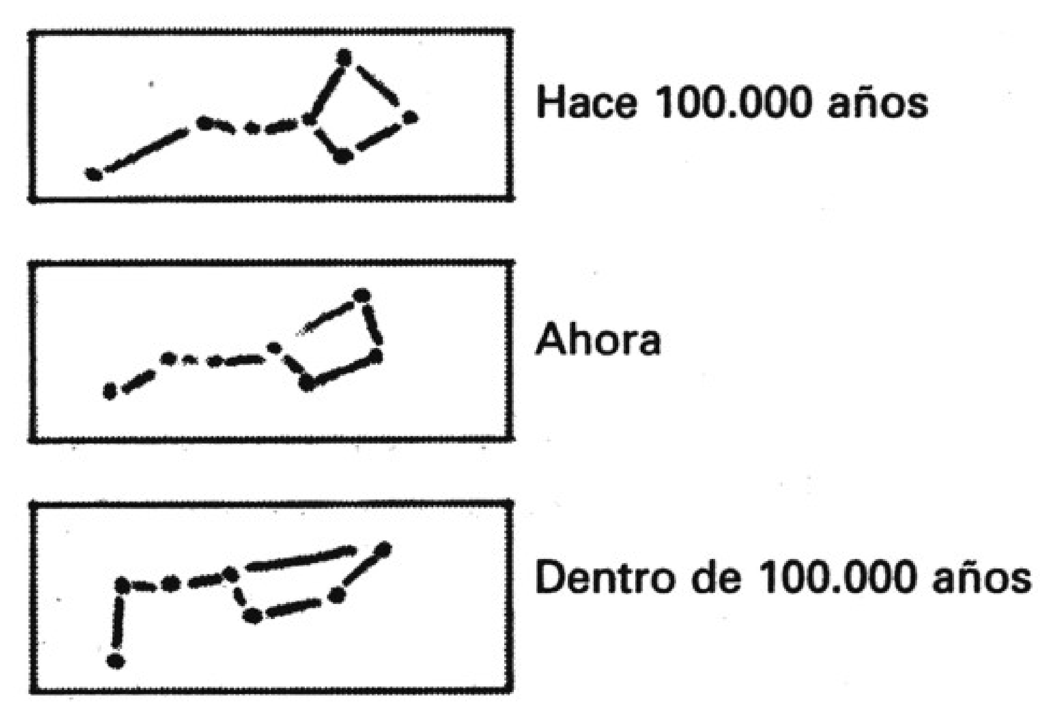


Figura 14. Cambio de forma del Cucharón a lo largo de doscientos mil años

Las constelaciones cambian de forma. La imagen de las estrellas montadas sobre una esfera celeste concéntrica con la Tierra es linda, simple y práctica. Pero no sirve cuando consideramos tiempos muy largos porque, en rigor, cada estrella tiene su movimiento propio en el espacio y no se mueven todas juntas. Por lo tanto, la forma de las constelaciones va cambiando y, por ejemplo, en el transcurso de doscientos mil años, el Cucharón en el cielo boreal va cambiando de forma como se ve en la figura 14.

Interludio interactivo

Dial eclíptico

Para poner un cierre a lo que hemos visto, les proponemos ensamblar un dial que permite resolver fácilmente problemas de este tipo: el 30 de mayo y hay luna llena. ¿Entre qué estrellas (en qué constelación del zodíaco) la veré por la noche?

Instrucciones para armar el dial

Los materiales se encuentran en las páginas siguientes. Para armar el dial para el hemisferio sur, habrá que referirse únicamente a los materiales de las páginas Dial 1, 2 y 3. En cuanto al dial que se empleará en el hemisferio norte, se utilizan únicamente los materiales de las páginas 4, 5 y 6. Por lo demás, las instrucciones son idénticas para los dos diales.

Comencemos por identificar los tres círculos: uno grande que lleva a las estrellas del zodíaco, uno más pequeño con las fases de la luna que lleva al sol adosado y otro pequeño con un redondel marcado que hará de ventana. Hay que recortar los tres círculos, y también el redondel de la pequeña ventana.

Ahora podemos superponerlos: abajo, las estrellas, en el medio, las fases de la luna y el sol, y arriba, el redondel con la pequeña ventana. Si alineamos los centros y les pasamos un broche de carpeta, podremos girarlos independientemente uno sobre otro pero siempre manteniéndolos concéntricos. Ahora debemos montar el todo sobre una de las bases del dial, que es donde están marcados el este, el oeste y el meridiano del observador.

Cómo usar el dial

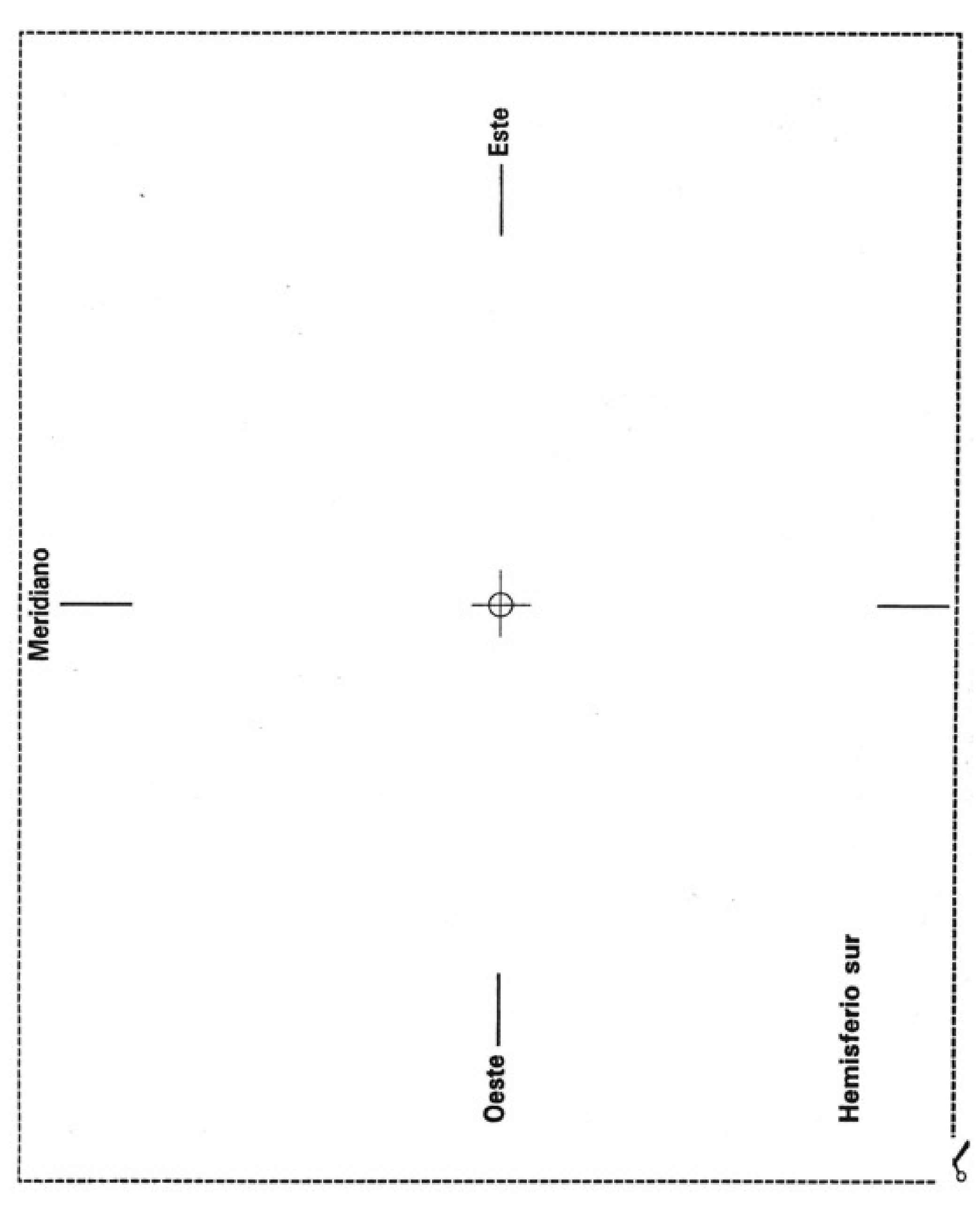
El centro del dial es la posición del observador. El dial permite ubicar al sol, la luna y las constelaciones zodiacales según estén visibles (es decir, por encima del horizonte), o no visibles (por debajo del horizonte), sobre o cerca de nuestro meridiano, o levantándose en el este o poniéndose en el oeste. En el curso de un día, los tres círculos se mueven juntos (solidarios) de este a oeste por encima del horizonte.

La posición del sol en el círculo de estrellas determina la época del año. Si configuramos el dial para representar fin de mayo o comienzos de junio, el sol se ubica en Géminis (los Mellizos). Así podemos determinar fácilmente las constelaciones visibles (todas salvo Géminis, que está en el resplandor del sol) y en qué momento de la noche se verán. En este caso, cuando el sol se ponga, Taurus (el Toro) estará por ponerse y Capricornio (la Cabra) se estará levantando. Acuario, Piscis y Aries están visibles. A medida que transcurre la noche veremos levantarse otra constelación cada dos horas: Sagitario, Escorpión, Libra cerca de medianoche, Leo, Virgo y Cáncer al amanecer.
Una vez ubicado el sol respecto de las estrellas según la época del año, ubicaremos la luna respecto del sol, según la época del mes. Supongamos que hay luna llena. Para indicarlo en el dial, moveremos solamente la pequeña ventana del redondel superior hasta que se vea la luna llena, manteniendo los otros dos redondeles como están.
La hora del día se determina por la posición del sol con respecto al horizonte. Podemos definir la hora girando los tres redondeles juntos. En nuestro ejemplo, la luna llena sólo está sobre el horizonte (es decir, visible) cuando el sol ya se ha puesto (o sea, de noche). El dial dice que la veremos entre las estrellas de Sagitario.

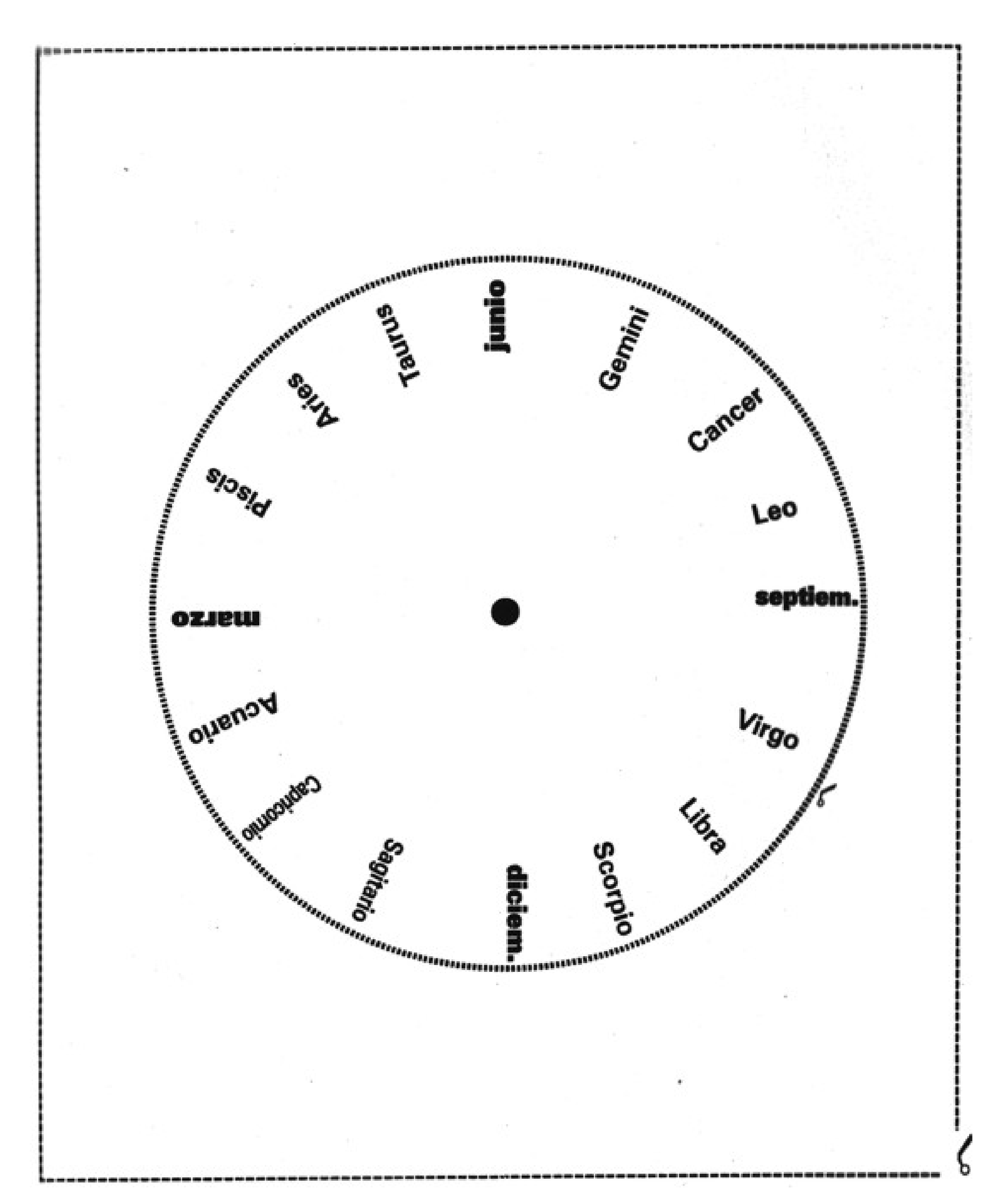
Las limitaciones del dial

El plano de los círculos en el dial es, grosso modo, el plano de la eclíptica. Decimos grosso modo porque, por ejemplo, sabemos que la órbita de la luna no se encuentra exactamente en el mismo plano que la del sol.
Al diseñar un dial plano (es decir, sin tercera dimensión) que se usa para cualquier latitud, estamos simplificando mucho las cosas. Sabemos, por ejemplo, que el horizonte sólo tiene ciento ochenta grados de extensión durante los equinoccios y que es más grande en verano y menos extenso en invierno. Sabemos también que ese "más" y ese "menos" varían con la latitud, al extremo de que en los polos el sol no se pone nunca en verano y no se levanta nunca en invierno. Pero en nuestro dial el sol se levanta a las seis de la mañana y se pone a las seis de la tarde, cualquiera sea la estación del año.

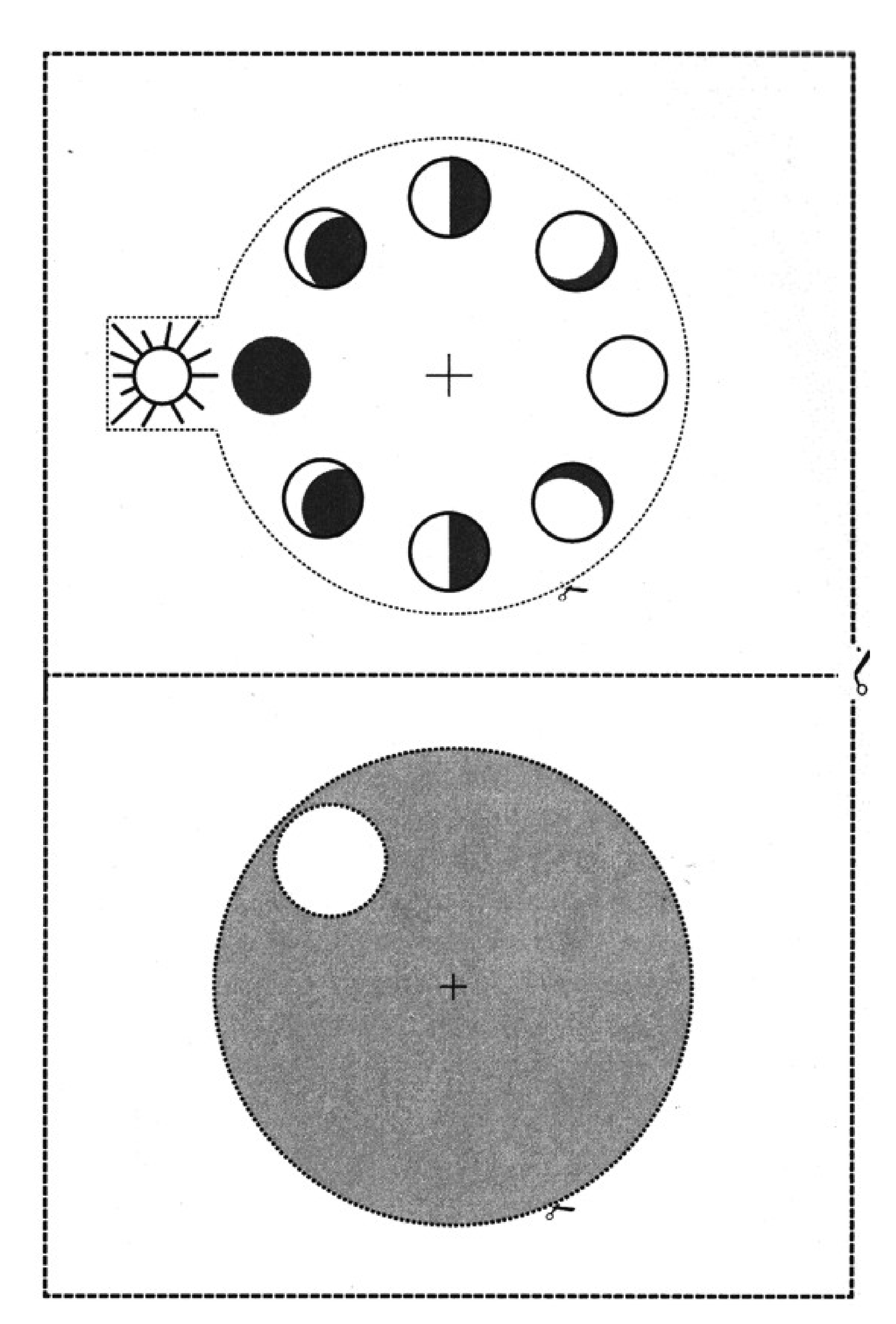
Son las simplificaciones, precisamente, las que nos permiten concentrarnos en los movimientos básicos de los astros.



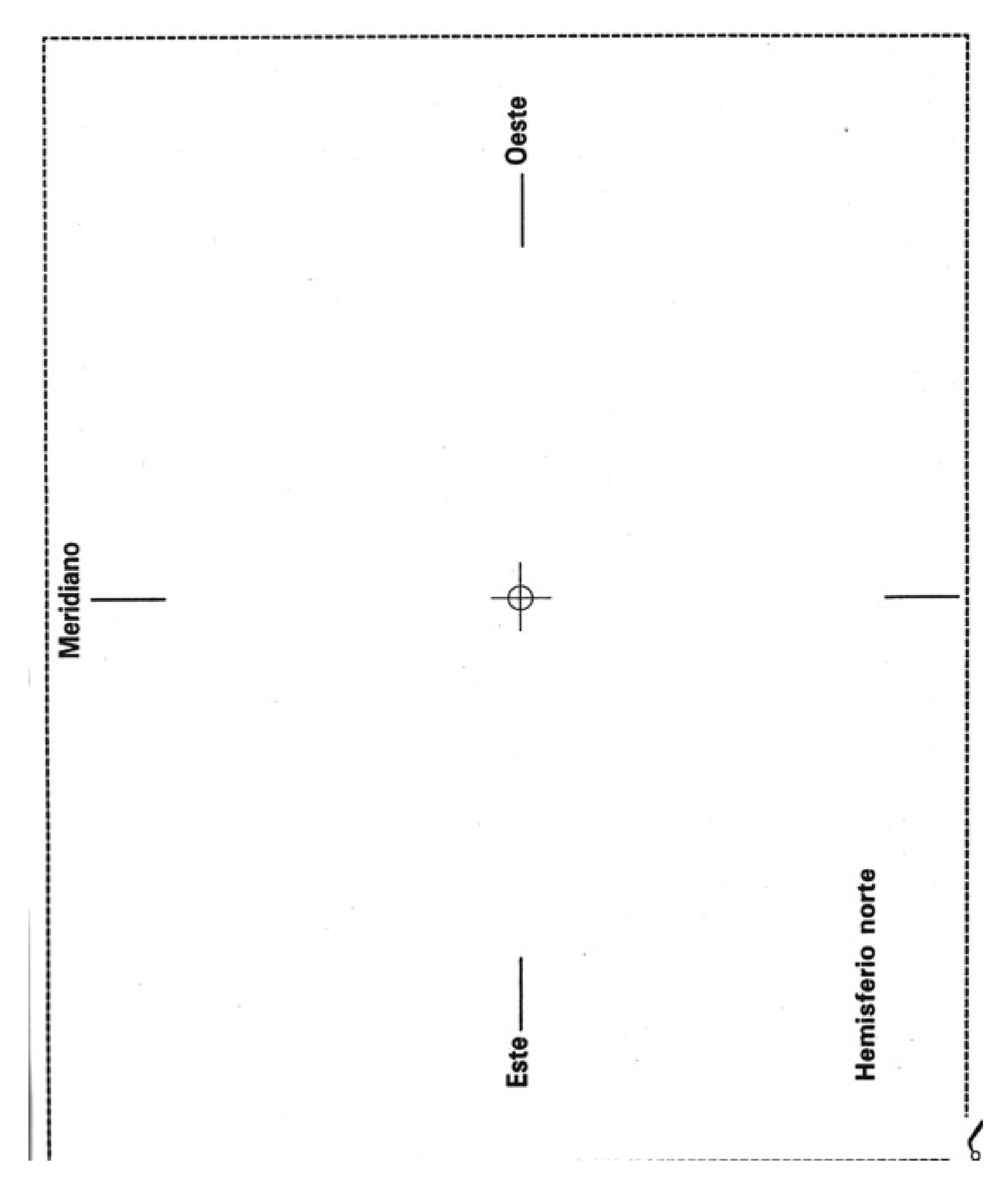
Dial 1


junio
Gemini
Cancer
Leo
septiem.
Virgo
Libra
Scorpio
diciem.
Sagitario
Capricornio
Acuario
marzo
Piscis
Aries
Taurus

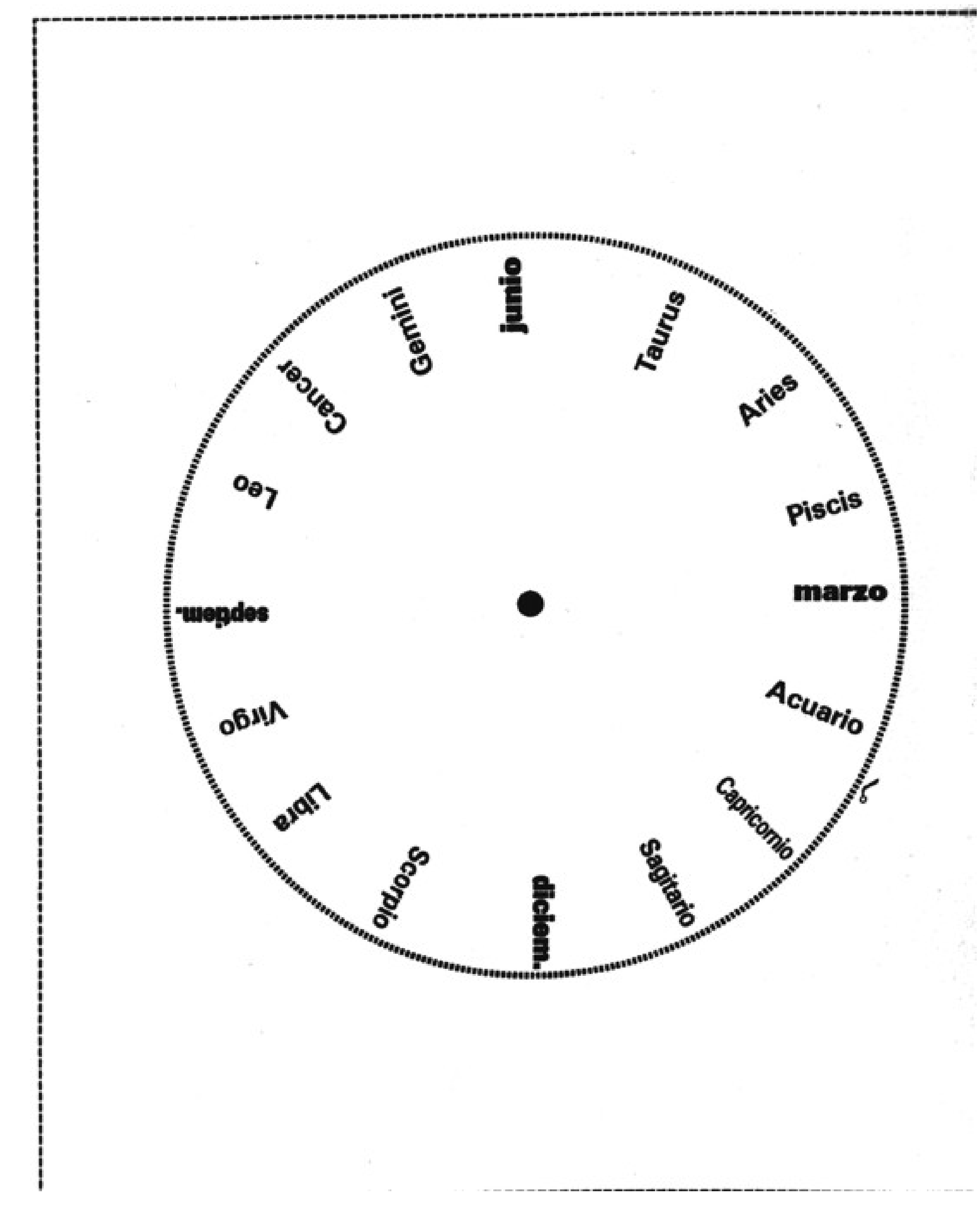
Dial 2



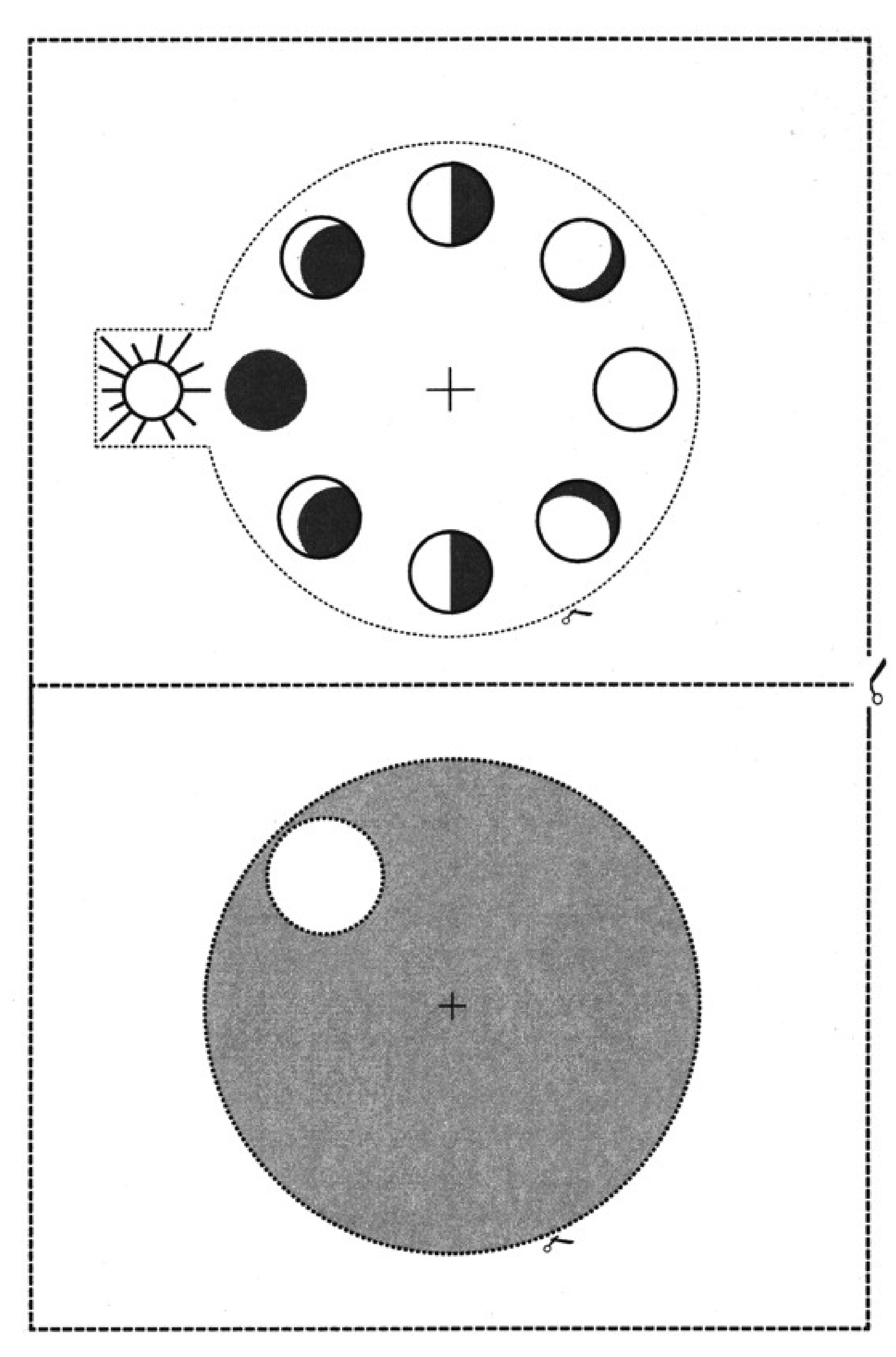
Dial 3



Dial 4


junio
Taurus
Aries
Piscis
marzo
Acuario
Capricornio
Sagitario
diciem.
Scorpio
Libra
Virgo
septiem.
Leo
Cancer
Gemini

Dial 5



Dial 6

Capítulo 5
Los vagabundos

Las primeras explicaciones

Desde un punto de vista totalmente ingenuo, es decir, si partiéramos de cero, sin saber nada previamente, ¿cómo podríamos explicar los movimientos de los astros en el cielo? Resumamos las observaciones:

Las estrellas se mueven de este a oeste, todas juntas, como si estuvieran sobre una esfera que gira trescientos sesenta grados en (casi) un día alrededor de un eje que pasa por los polos celestes. El camino de las estrellas en el cielo, los círculos que describen alrededor del polo celeste y el lugar donde vemos que salen y se ponen en nuestro horizonte, es el mismo a lo largo de todo el año. El sol, igualmente, se mueve de este a oeste pero un poco más lentamente: de día en día se levanta y se pone cuatro minutos más tarde que las estrellas. Esto resulta evidente a lo largo del año: las estrellas que vemos a la misma hora van variando y el sol parece moverse hacia atrás entre las estrellas (trescientos sesenta grados en un año) en un camino que hemos llamado la eclíptica. El camino del sol en el cielo no es el mismo a lo largo del año: el lugar donde sale y se pone en nuestro horizonte y el punto más alto que alcanza en nuestro cielo varían con las estaciones (verano e invierno). La luna también se mueve de este a oeste pero más lentamente todavía: de día en día, sale y se pone casi una hora más tarde que las estrellas. Se mueve entre ellas a través del zodíaco en un recorrido que casi coincide con la eclíptica del sol (aunque no exactamente, de modo que no tenemos eclipses todos los meses).

Todo esto, como hemos visto, era conocido hace miles de años por diversos pueblos, y tabulado en diversas formas de modo de poder predecir eclipses (importantes por razones mágico-religiosas) y las estaciones del año (importantes para la agricultura). Pero con el florecimiento de la civilización griega, surge un cambio fundamental en la forma de entender y concebir el cielo. Los griegos no se contentan con tabular los fenómenos, sino que buscan explicarlos, no ya con cuentos más o menos fabulosos (como los que hablan de barcos que llevan el sol de un lado a otro o de tortugas que soportan el peso del universo), sino mediante

explicaciones racionales, lo más sencillas posibles. En lugar de explicaciones individuales para cada fenómeno, buscan esquemas explicativos útiles que sirvan no sólo para predecir sino también para establecer patrones que rijan y den sentido a multitud de fenómenos. Estos esquemas son lo que hoy llamamos modelos teóricos.

El modelo más simple que explica los movimientos diarios suponía una esfera enorme, centrada en una Tierra inmóvil. La esfera rota alrededor de un eje que pasa a través de los polos de la Tierra. Las estrellas están montadas -o son agujeros- en la gran esfera y por lo tanto están todas a la misma distancia de la Tierra y se mueven en caminos circulares alrededor de ella.

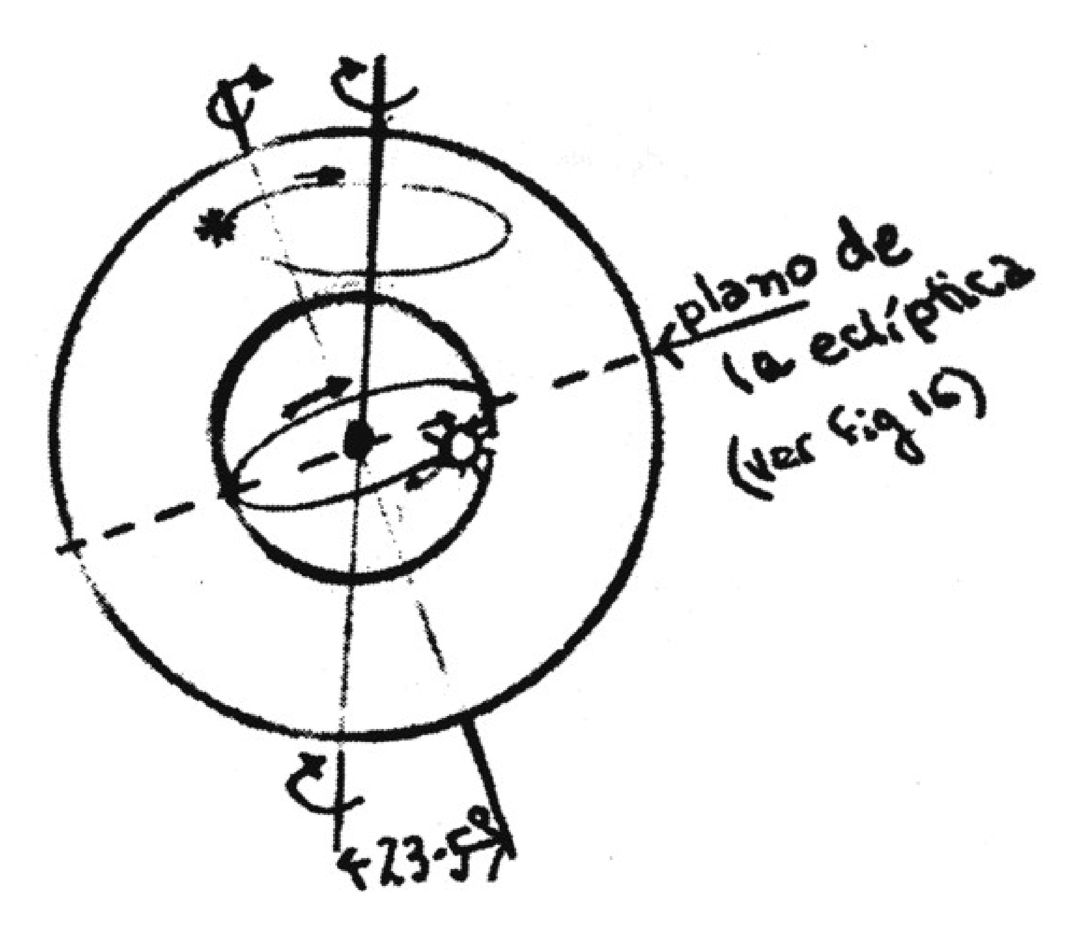


Figura 15. Modelo que explica los movimientos diarios y el movimiento sur-norte-sur del sol durante las estaciones del año

Para explicar el movimiento anual del sol entre las estrellas, era necesario un modelo más complejo. Así, se agrega otra esfera, más pequeña, que lleva al sol. Para dar cuenta de las variaciones que experimentamos en el movimiento anual del

astro, esta esfera gira alrededor de un eje propio, inclinado 23,5° con respecto al eje de la esfera de las estrellas.

Asimismo, para dar cuenta del movimiento y de las fases de la luna, se la suponía montada sobre su propia esfera, más cercana a la Tierra, cuyo eje también está inclinado unos 23,5° con respecto al eje de la esfera de las estrellas (el eje de los polos).

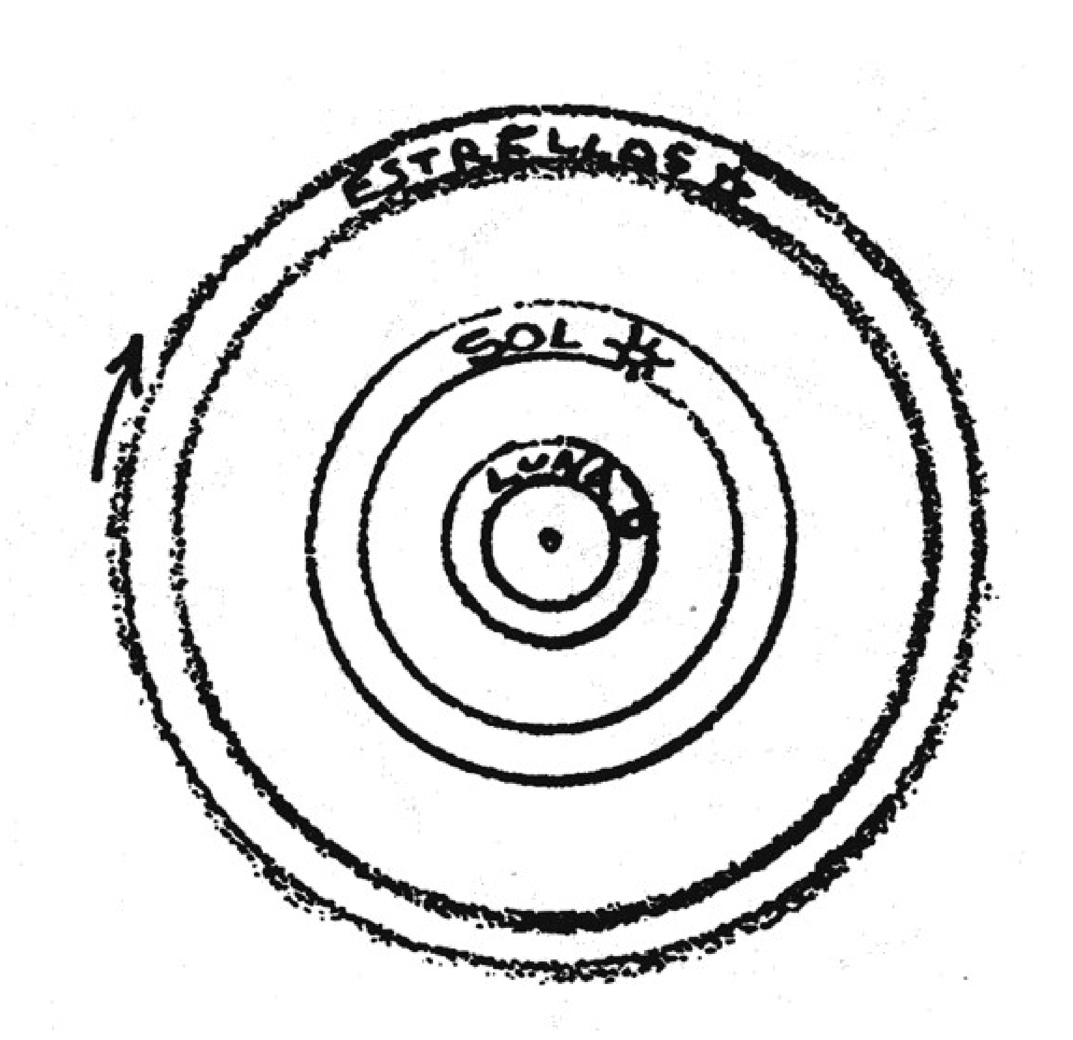


Figura 16. Modelo griego temprano

He aquí un modelo basado en un principio general simple: esferas (la forma geométrica más simétrica, considerada "perfecta") que se mueven con velocidad uniforme (siempre igual, lo cual era considerado el movimiento "perfecto"). Nuestro planeta, en este modelo, no se mueve.

Un corte de las tres esferas en el plano de la eclíptica da tres círculos, con el zodíaco en el más grande, el sol moviéndose en el intermedio y la luna en, o cerca de, el más pequeño. Este modelo es, en efecto, el que usamos en nuestro dial eclíptico del capítulo anterior.

En algún momento, alguien de la escuela tardía de Pitágoras[15] postuló que en vez de tres esferas independientes (una cada una para las estrellas, el sol y la luna), que giraran a distintas velocidades pero todas en el mismo sentido, se las podía concebir unidas de tal forma que la esfera de las estrellas arrastrara consigo las otras dos. De este modo el sol, la luna y las estrellas se mueven juntos para dar cuenta de la rotación diaria y, simultáneamente, las esferas propias del sol y de la luna giran en sentido contrario sobre su eje, con las velocidades apropiadas (una vuelta entera en un año para el sol; una vuelta entera en un mes para la luna).

Esta idea, que considera que todos los astros tienen un movimiento diario en común, al que se superponen los movimientos propios, es el paso anterior a la postulación de un modelo en el que la esfera de las estrellas está inmóvil y, en cambio, es la Tierra la que gira sobre su eje hacia atrás, dando así cuenta del movimiento diario compartido de los astros. Hubo quien propuso esta simplificación -que es la Tierra la que rota y no las estrellas-, pero no tuvo aceptación; tal era la fuerza de la idea de una Tierra inmóvil. Al fin y al cabo, se argumentaba, si estuviéramos girando seguramente lo sentiríamos; además habría vientos que se llevarían las cosas. Se tardó mucho tiempo en vencer estos argumentos.

Los planetas

Hasta aquí todo marcha bien: el modelo explica en forma satisfactoria lo que hemos visto. Pero todavía no realizamos todas las observaciones: los astros celestes que distinguimos a simple vista no son solamente la luna, el sol y las estrellas. Mirando con cuidado .observamos que hay "estrellas" que a veces están y otras veces no. Que a veces son muy tenues, y otras, brillantes como joyas suspendidas en el firmamento. Que a veces se mueven más rápido que las otras estrellas, y otras más despacio quedando rezagadas. En suma, "estrellas vagabundas" o planetas, como las llamaban los antiguos. (En griego la palabra planetas quiere decir

[15] La escuela de Pitágoras tuvo vigencia durante dos siglos, de 500 a.C. a 300 a.C., aproximadamente.

"vagabundos".) A simple vista se distinguen cinco: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter, Saturno. Con telescopio, se ven tres más: Urano, Neptuno y Plutón.

Generalmente, el planeta más fácil de ubicar en el cielo es Venus, porque nunca está demasiado lejos del sol (lo que quiere decir que se ve solamente al amanecer o a la puesta del sol). En una época se pensaba que eran dos astros diferentes, y se los llamaba "la estrella vespertina" y "la estrella matutina".

Si seguimos el movimiento de Venus día a día veremos un baile en zigzag. Supongamos que lo avistamos al atardecer, cuando el sol se pone (estrella vespertina), y que en días sucesivos, lo vamos viendo cada vez más lejos del sol hasta llegar a cuarenta y siete grados (unos seis puños) de distancia. Ahí parece detenerse; en días sucesivos empieza a acercarse nuevamente al sol, hasta que desaparece en su brillo. Días después, reaparece del otro lado del sol (estrella matutina) y va alejándose de día en día hasta llegar a unos cuarenta y siete grados de distancia; de ahí empieza a volver, acercándose nuevamente al sol hasta desaparecer en su brillo y aparecer nuevamente a los pocos días como la estrella vespertina. Venus, como vemos, no titila. Los planetas se distinguen de las estrellas no sólo por vagabundear, sino también porque no titilan. El titileo se debe a los movimientos del aire de nuestra atmósfera, que hacen que la luz que nos llega a los ojos (luz directa en el caso de las estrellas, reflejada del sol en el caso de los planetas) cambie de intensidad de un momento a otro y en diferentes sitios. Los planetas están mucho más cerca de nosotros que las estrellas y, pese a ser mucho más pequeños, no se ven como simples puntos en el espacio, sino que tienen tamaño, dimensión: son como una cabeza de alfiler comparados con los pinchazos de alfiler de las estrellas en nuestro cielo. Así, las distintas porciones del planeta titilan por separado y el término medio, que es lo que vemos, es un brillo constante.

Si además de no titilar el astro zigzaguea, como Venus, pero no llega a más de veintiocho grados (unos cuatro puños) al alejarse del sol, podemos identificarlo como Mercurio. Pero por lo general, para saber cuál de los planetas estamos mirando necesitaremos tablas astronómicas, llamadas efemérides, que dan la posición de los planetas para cada día del año.

Además de Mercurio y Venus, se puede ver (a veces, depende de dónde estén en su recorrido) a Marte, Júpiter y Saturno. Estos astros, igual que Venus y Mercurio, se

mueven con respecto a las estrellas en el mismo sentido que el sol y la luna (hacia el este) y aproximadamente a lo largo del mismo camino (la eclíptica). Cada tanto parecen detenerse y empiezan a moverse un tiempo en sentido contrario (hacia el oeste), lo que se llama movimiento retrógrado. Pero a diferencia de Venus y Mercurio, los otros tres planetas se mueven lentamente a través de las estrellas: Marte tarda dos años en dar una vuelta completa alrededor de la eclíptica, Júpiter tarda unos doce años y Saturno unos treinta años. El movimiento retrógrado ocurre casi una vez por año. La figura 17 da una idea de lo que se puede observar:

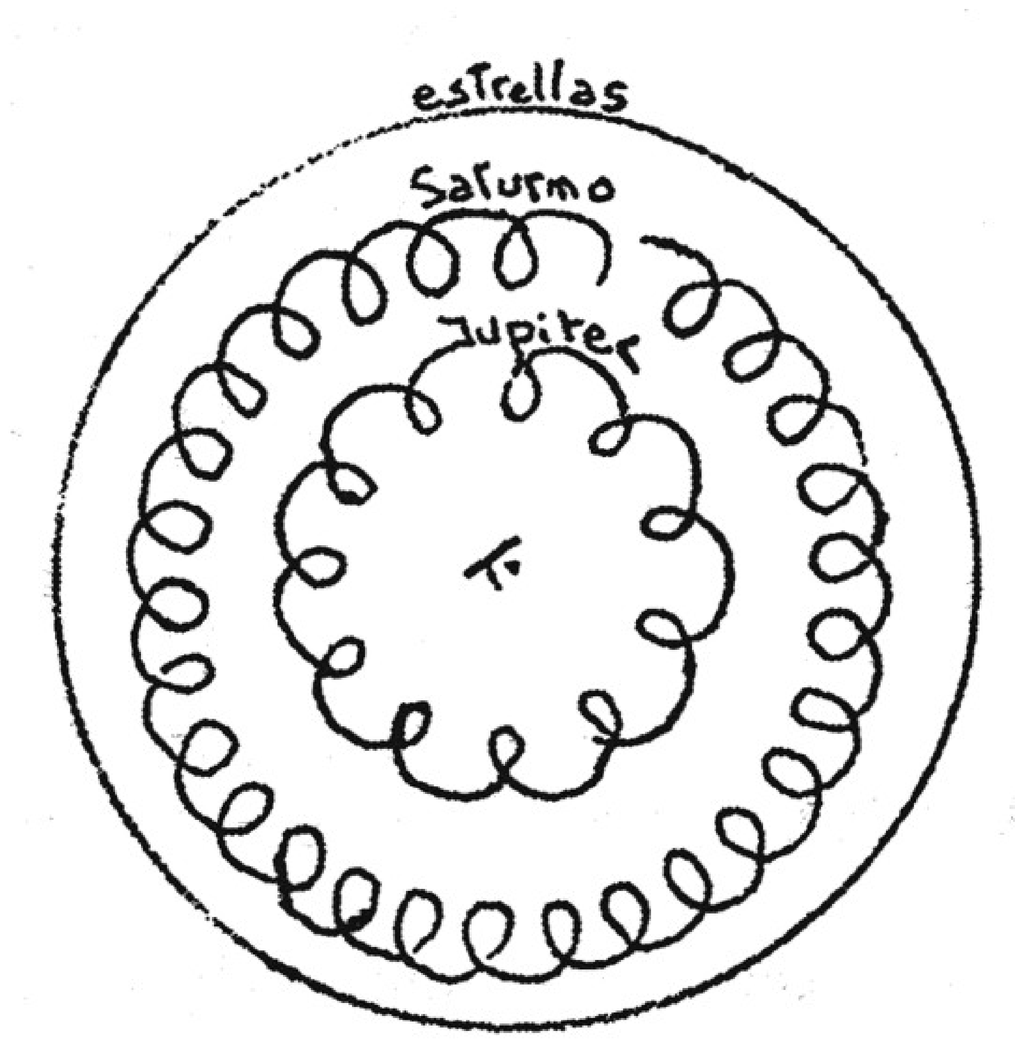


Figura 17. Movimiento de Júpiter y Saturno visto desde la Tierra (diagrama del astrónomo Cassini, 1709)

En los modelos de la escuela de Pitágoras, los planetas seguían el mismo esquema que el sol y la luna, de modo que Saturno, Júpiter y Marte (que se mueven lentamente) ocupaban esferas concéntricas ubicadas entre las estrellas y el sol. Entre el sol y la Tierra estaban las esferas de Venus y Mercurio (que se mueven rápido). Pero evidentemente una esfera para cada cuerpo celeste no era suficiente para explicar los movimientos retrógrados. Otros modelos, como el de Eudoxo (siglo IV a.C.), proponían varias esferas para cada cuerpo, todas concéntricas pero que rotaban sobre ejes inclinados a distintos ángulos.

Estos modelos que proponían esferas cristalinas concéntricas gozaron del apoyo de Aristóteles (300 a.C.), cuya fama y prestigio eran enormes. Para Aristóteles, la esfera es el cuerpo sólido perfecto. Por lo tanto, los movimientos de los astros han de ser círculos sobre esferas de cristal. Más aún, los astros mismos han de ser esferas perfectas, sin defectos ni mancillas. Y todo lo que se mueve en el cielo se mueve alrededor de la Tierra, mientras que la Tierra permanece siempre inmóvil. Estas ideas aristotélicas dominaron la astronomía incipiente durante siglos.

Refinamiento del modelo celeste para incluir los planetas

Con el correr del tiempo resultaba evidente que los modelos descritos eran demasiado rudimentarios. No daban cuenta de los cambios de velocidad, tamaño y brillantez de los planetas. Tampoco daban cuenta, por ejemplo, de que el sol se mueve un poco más rápido en algunas épocas del año que en otras.

Para refinar el modelo se fueron introduciendo a lo largo del tiempo entes geométricos (las tres E de los modelos griegos: excéntricos, epiciclos, ecuantes) que complicaban el sistema original. Así, para explicar el cambio de velocidad del sol a lo largo del año, se propuso un sistema excéntrico, que situaba a la Tierra un poco alejada del centro del círculo en que se mueve el sol. De esta forma, pese a que éste se mueve con velocidad uniforme, el observador terrestre ve ese movimiento como si fuera desparejo.

Sin embargo, para algunos, esta desviación de la simetría circular resultaba intolerable. Además: ¿qué significado tiene ese punto alrededor del cual se mueve el sol? Peor aún el esquema excéntrico no era suficiente para describir los movimientos planetarios. Así es que se agregaron círculos pequeños, llamados

epiciclos, que ruedan sobre los círculos grandes. Pero aun el sistema de epiciclos no lograba explicar todo lo que se veía, y así es como Ptolomeo complica aún más el modelo agregando un punto llamado ecuante para intentar explicar los movimientos de los planetas.

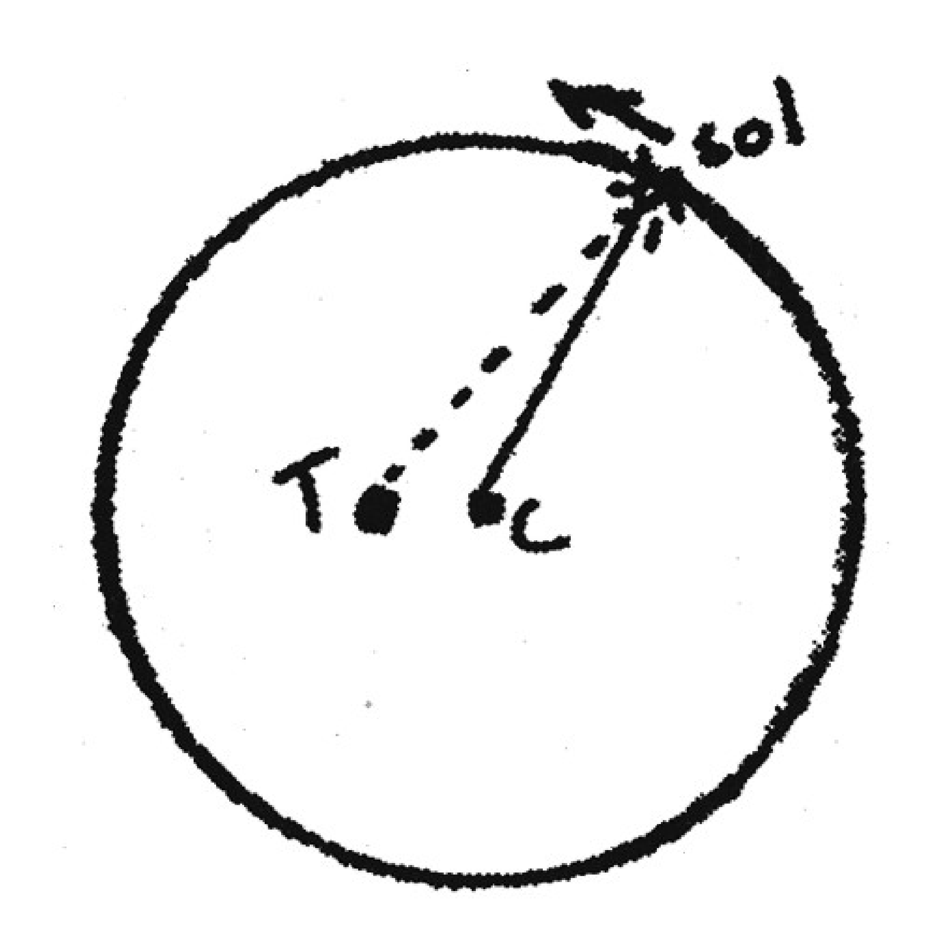


Figura 18. Esquema excéntrico

Al elegir astutamente los radios de los círculos, las distancias excéntricas, las velocidades de rotación y la inclinación de los planos de los círculos, surgía una maquinaria de exquisita complejidad y de enorme utilidad tanto para astrónomos y navegantes como para aquellos que predicen el futuro y hurgan el pasado, los astrólogos.

Hacia el año 100 de la era cristiana, el modelo geocéntrico, llamado "ptolemaico", daba cuenta, por fin, de todas las observaciones. Con un sistema geométrico que constaba de cincuenta y cinco círculos, el modelo reproducía y predecía correctamente los movimientos de los astros observables a simple vista. Y lo hacía

salvaguardando las nociones aristotélicas de perfección: Tierra inmóvil, velocidades constantes, simetrías, movimientos circulares. Pero se había pagado un precio alto por el éxito obtenido: la Tierra no ocupaba más el centro de los círculos y los movimientos no se producían necesariamente alrededor de nuestro planeta.

Capítulo 6
Los modelos celestes

Todo el mundo sabe que la Tierra da vueltas alrededor del sol. Pero... ¿es tan evidente esto? La verdad es que no es muy intuitivo. Por lo pronto, la Iglesia no lo aceptó hasta el siglo XIX. Sin embargo, sus razones no eran estrictamente científicas y tenían mucho de la arrogancia que coloca a los seres humanos en el centro del sistema cosmológico[16]. Lo que nos concierne aquí son las razones científicas para el pasaje, paulatino por cierto, del sistema ptolemaico (centrado en la Tierra, o geocéntrico) al sistema copernicano (heliocéntrico, o centrado en el sol). Los protagonistas de ese pasaje, como vislumbramos en el capítulo anterior, fueron los planetas.

Hemos visto que, en su época, Ptolomeo perfeccionó un modelo geométrico de los movimientos de los astros celestes visibles a ojo "desnudo", que acomodaba todas las observaciones. El modelo suponía a la Tierra inmóvil con todos los astros girando a su alrededor, como los primeros modelos griegos. Los movimientos de los planetas habían complicado el modelo con dispositivos geométricos un tanto engorrosos (ecuantes, epiciclos, excéntricos), y se habían abandonado muchas de las suposiciones del antiguo modelo aristotélico: la Tierra no ocupaba ya el centro de un círculo y las velocidades de los astros no eran necesariamente constantes. Pero la Tierra seguía inmóvil y las órbitas a su alrededor eran círculos. Y el modelo era preciso.

Tan preciso, en efecto, que todavía se emplea al navegar para orientarse en el mar (aunque actualmente los posicionadores geosatelitales están desplazando y terminarán suplantando a las efemérides, el sol y las estrellas). Y tan útil e intuitivo que lo usamos en nuestro lenguaje cotidiano, cuando decimos: "el sol se pone" o "las estrellas salen".

Si este modelo servía para dar cuenta hasta de los más ínfimos detalles de los movimientos de los astros en el cielo, ¿cómo se explica el advenimiento del modelo heliocéntrico? Aquí necesitamos hacer un hiato y entender las consideraciones que

---

[16] Con una simple transposición de letras, pasamos de GEOcéntrico a EGOcéntrico. ¿Será significativo?

entran en la adopción de un modelo. Al fin de cuentas, Aristarco (en el siglo 3 a.C.) ya había propuesto un sistema heliocéntrico. ¿Por qué no fue aceptado? Por un lado, porque iba en contra de las doctrinas filosóficas de Aristóteles, basadas en el movimiento y el lugar "naturales" de cada ente. El lugar natural de la Tierra según esta doctrina es el centro del universo; su movimiento natural es... no moverse.

Por otro lado, Aristarco no empleó su sistema para hacer predicciones sobre las posiciones de los planetas. Un modelo de este tipo, que no ofrece predicciones que se puedan verificar o desmentir, es un modelo especulativo. El modelo geocéntrico vigente también era especulativo, pero no iba en contra de las creencias filosóficas del momento. Por lo tanto, si de especulación por especulación se trata, mejor quedarse con lo cómodo y conocido.

Unos cuatrocientos años más tarde, lo cómodo y conocido habían evolucionando hasta convertirse en lo que llamaríamos un modelo fenomenológico (el modelo ptolemaico), que es una especie de máquina de calcular que da cuenta de los fenómenos y permite hacer predicciones pero no ofrece explicaciones. El modelo explicativo se hace esperar: recién aparece con Newton... unos mil seiscientos años más tarde.

En rigor, buena parte de esa gran cantidad de tiempo corresponde a las invasiones bárbaras y a la Edad Media en la que Europa quedó sumida en la oscuridad intelectual. Así que el hilo de nuestra historia se corta y lo retomamos en el siglo XV con Copérnico.

Los pasos que llevaron a abandonar a Ptolomeo

Nicolás Copérnico (1473-1543) era un joven estudiante en Polonia cuando Colón descubrió América. Su libro Sobre las revoluciones de las órbitas celestes fue, valga la redundancia, revolucionario cuando se publicó, porque planteaba otra forma de encarar el problema de predecir las posiciones de los planetas. Su modelo suponía un sol quieto en el centro del universo y todos los astros, incluida la Tierra, girando a su alrededor.

Copérnico sabía que iba a haber mucha oposición a su propuesta y recién se decidió a publicar el libro y mandar una copia al Papa Gregorio poco tiempo antes de morir. En su dedicatoria, Copérnico alega que la mayor virtud de su sistema es la

simplicidad. Admite que es casi contrario a nuestro entendimiento pero arguye que es armonioso, simétrico, ordenado y seguramente refleja la mente de Dios. Para Copérnico, hombre de alto rango eclesiástico, encontrar un sistema que ubica las órbitas planetarias con la mayor parsimonia posible era en sí un acto de reverencia a Dios. El choque entre Galileo y la Iglesia medio siglo más tarde le hubiera resultado doloroso.

Aunque el modelo de Copérnico es heliocéntrico, sigue utilizando elementos netamente aristotélicos: círculos y velocidades constantes. Y, al fin de cuentas, para dar una buena descripción cuantitativa de los movimientos planetarios termina empleando más de treinta círculos, incluidos epiciclos y excéntricos. No es una gran ganancia respecto del sistema de Ptolomeo (sobre todo, porque ni siquiera es más preciso).

Resumamos: la innovación de Copérnico reside en una descripción cualitativamente más simple, pero que cuantitativamente no es mejor que la de Ptolomeo. No sólo no es mejor, sino que resulta que ambas son menos exactas de lo que se creía. Esto es lo que constata Tycho Brahe (1546-1601), joven danés de familia noble[17], quien observó y registró el momento en que ocurría un evento astronómico (la conjunción, o encuentro aparente, de Júpiter y Saturno)[18] y descubrió discrepancias de un mes con las tablas ptolemaicas y de varios días con las copernicanas. (Hay que reconocer que un mes en los mil cuatrocientos años transcurridos desde Ptolomeo no es una discrepancia llamativa). A la sazón, Tycho tenía diecisiete años. Comprendió que para poder elaborar una teoría satisfactoria de los movimientos de los planetas, era necesario tener mejores datos experimentales, obtenidos mediante un estudio detallado y sistemático, y puso manos (u ojos) a la obra.

Con ayuda del rey Federico II de Dinamarca —quien se convirtió en su protector e invirtió una tonelada (literalmente) de oro en el proyecto— Tycho hizo construir un observatorio en una isla llamada Uraniborg. El proyecto era ambicioso. Además de los instrumentos astronómicos había cuatro observatorios, biblioteca, talleres,

---

[17] De él se cuenta que en un duelo le cortaron la nariz. Se la hizo reconstruir, no se sabe bien si de argamasa o de metal pintado. Y se dice que llevaba siempre consigo una cajita donde guardaba pegamento por si la nariz se le desprendía. Las malas lenguas afirman que lo del duelo era pura invención y que había perdido la nariz porque era sifilítico

[18] Pese a su buena educación en universidades alemanas, Tycho era hijo de su época y creía que esa conjunción era responsable de la plaga que azotó a Europa poco después.

imprenta, molino de papel, aposentos para astrónomos, estudiantes y sirvientes. Y hasta una prisión para quienes no se portaban como era de esperar. Algunos de los instrumentos que Tycho hizo construir eran enormes, montados sobre cimientos sólidos, requisitos necesarios para obtener buenos datos. Como buen experimentador que era, se ocupó de calibrar sus instrumentos, construyó tablas de errores sistemáticos y corrigió sus resultados para tomar en consideración la refracción de la luz debido a la atmósfera. El resultado fue un gran aumento en precisión: los datos de Tycho son confiables hasta dos minutos de arco (1/30°), mientras que las tablas usadas por los teóricos hasta entonces eran confiables sólo hasta diez minutos de arco (1/6°). Para darse una idea de lo que significan estos números, recuerden que en las mediciones que hicimos de los movimientos del sol, la luna y las estrellas usando nuestro puño calibrado, un error del tamaño de un meñique (el mío, al menos) corresponde a 1/2°. En cambio, las mediciones hechas con un rayo láser son precisas hasta 1/1000°.

Aunque era fundamentalmente un experimentador, Tycho intentó cerrar la brecha entre los modelos *geo* y *helio*céntrico, proponiendo un modelo celeste de compromiso en el cual la Tierra no se mueve, el sol se desplaza alrededor de la Tierra, y los planetas, alrededor del sol. También contribuyó al incipiente y lentísimo desprestigio de las ideas aristotélicas al observar una nueva estrella (lo que se llama una "nova") que aparece en la constelación de Casiopea (en las proximidades del polo norte) y, de paso, descubrió también un corneta lejano. Observaciones como éstas, de objetos nuevos o que atraviesan las esferas celestes, refutan los fundamentos del modelo griego según el cual los cielos eran inmutables, es decir, nada en ellos cambiaba nunca.

Cuando murió su rey protector, Tycho Brahe se mudó a Praga. Allí llegó también, para trabajar con Tycho, el joven alemán Johannes Kepler (1571-1630), otro personaje pintoresco, con un pie en la Edad Media y otro en el mundo moderno. Kepler había ideado un sistema para explicar el tamaño de las órbitas de los planetas, vinculando los planetas conocidos con los cinco sólidos regulares. En geometría, sólidos regulares son las figuras tridimensionales cuyos lados son todos del mismo largo. Existen cinco sólidos de este tipo: cubo, tetraedro, octaedro, dodecaedro e icosaedro. A Kepler le parecía demasiada casualidad que hubiera cinco

sólidos regulares y cinco espacios interplanetarios (entre los seis planetas conocidos). Las órbitas de los planetas, pensó, tenían que estar determinadas por los sólidos regulares. Es así que desarrolló la idea de encajar los sólidos uno dentro de otro como muñecas rusas, circunscribiendo cada sólido en una esfera que, a su vez, queda inscripta en el sólido siguiente. Estas seis esferas tenían el tamaño aproximado de las órbitas planetarias alrededor del sol.

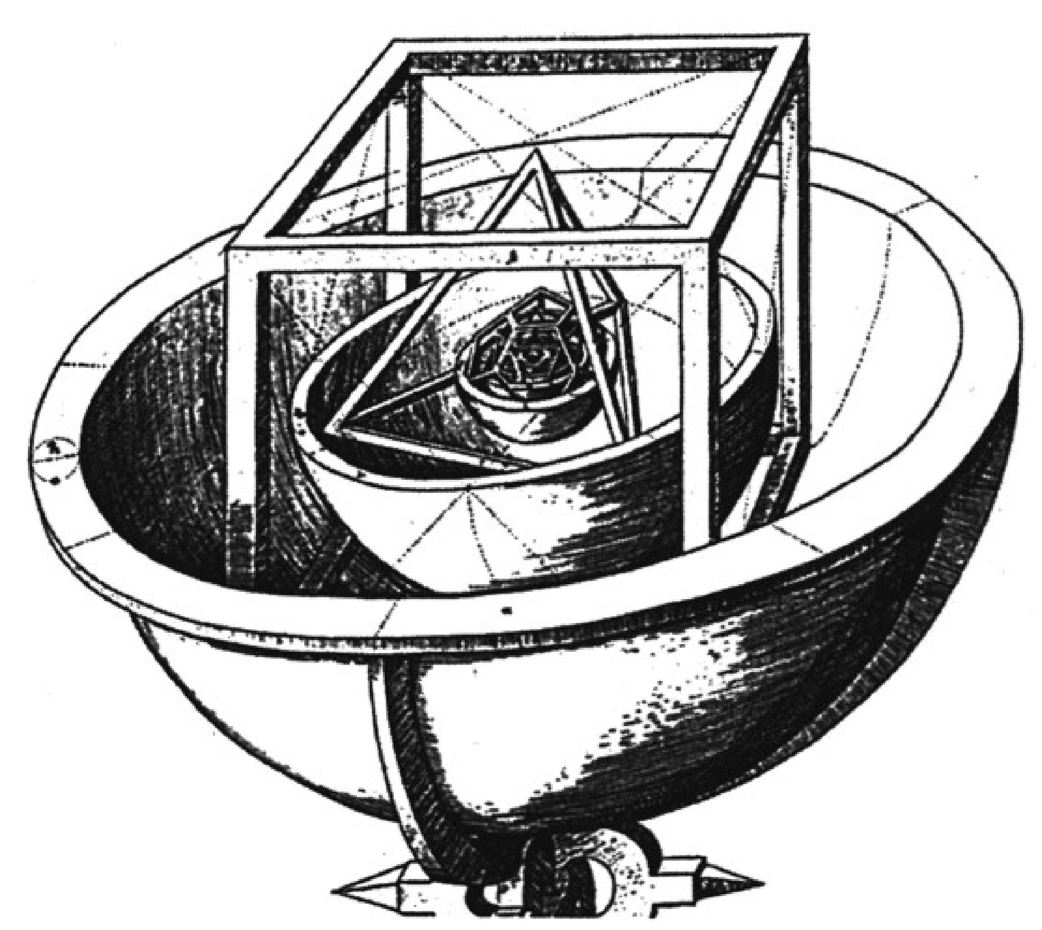


Figura 19a. Modelo del universo según Kepler

En la figura 19a se distingue parte del esquema de Kepler. La esfera exterior lleva la órbita de Saturno y circunscribe al cubo. La esfera siguiente, que lleva la órbita de Júpiter, está inscripta en el cubo y circunscribe al tetraedro. La órbita de Marte está inscripta en el tetraedro y así sucesivamente.

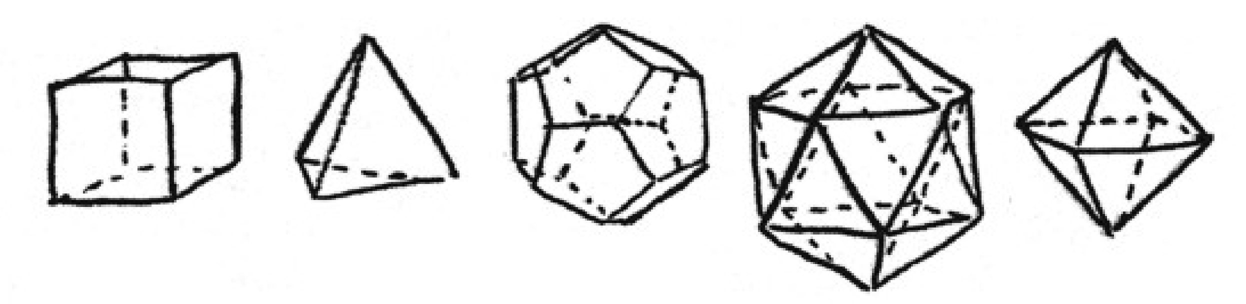


Figura 19b. Los cinco sólidos regulares en el orden en que encajan en el modelo de Kepler

Tycho Brahe se interesó por el joven Kepler, cuyo trabajo demostraba tanto imaginación como aptitud computacional. Lo tomó como asistente y le encargó resolver un problema: calcular la órbita del planeta Marte. Para sus cálculos, Kepler supuso, como era costumbre hasta ese momento, que Marte se movía en círculos. Pero al comparar sus resultados con los datos de las observaciones de Brahe, no concordaban. Es decir, las discrepancias eran mayores que el error experimental. Y Kepler no dudaba de que los resultados experimentales de Tycho Brahe eran totalmente confiables. Por lo tanto, concluyó Kepler, es la teoría la que no "cierra".

Ahora sabemos que fue un gran acierto que el problema de Kepler hubiera sido Marte y no otro de los planetas. Como la órbita de Marte es la más excéntrica de todas, la falta de acuerdo de los cálculos con los resultados experimentales era más evidente de lo que hubiera sido para otro de los planetas.

Azuzado por este resultado, Kepler se propuso abandonar la suposición de que las órbitas se componen de círculos y operar a la inversa: en vez de tratar de corroborar las observaciones, utilizar los datos de Tycho Brahe para encontrar la forma de las órbitas en un modelo heliocéntrico. Así es como descubre lo que ahora damos por sentado: que las órbitas de los planetas alrededor del sol son elipses[19].

Esta es la primera de tres leyes enunciadas por Kepler. Según veremos, le servirán de base a Newton para formular su teoría de la gravitación universal.

---

[19] La elipse es una figura geométrica definida por dos focos tales que la distancia de un foco a un punto sobre la elipse y de allí al otro foco es siempre la misma. Kepler enuncia que el sol está ubicado en uno de los focos. (El otro foco es un punto geométrico y no tiene significación física.) Cuanto más alargada la elipse, tanto más distan los focos entre sí. Cuando los focos se acercan hasta que coinciden, la elipse se vuelve un círculo.

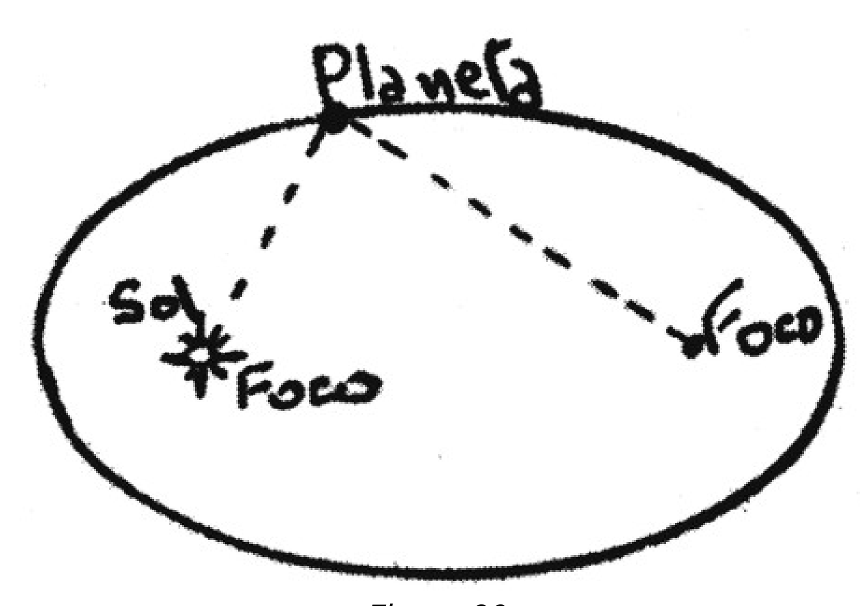


Figura 20
Órbita elíptica de un planeta, con sus dos focos (el sol está ubicado en uno de ellos)

La segunda ley de Kepler termina con aquello de las velocidades uniformes; dice que al transitar por su órbita elíptica, el movimiento del planeta es más rápido cuando está cerca del sol.

Después de enunciadas estas dos leyes, Kepler continuó trabajando diez años más hasta encontrar la solución para su problema original, el que había intentado resolver con los sólidos regulares: hallar la relación entre los movimientos de los distintos planetas. Ya se sabía que cuanto mayor era la distancia del planeta al sol, tanto mayor era el tiempo necesario para que el planeta recorra su órbita. Lo que Kepler logró fue dar forma matemática a esa relación, y enunciarla como su tercera ley.

Conceptualmente, el aporte de Kepler es considerable. Sus tres leyes proveen al sistema copernicano de una base matemática que permite predecir los movimientos de los planetas. Pero si bien nosotros lo recordamos hoy a Kepler por sus tres leyes empíricas, él mismo, hasta el fin de su vida, consideró el sistema de sólidos y esferas anidados como su máxima contribución a las ciencias. Para nosotros, ese sistema es pura numerología, es decir, manipulación de números hasta que surgen interpretaciones interesantes o divertidas pero carentes de fundamento causal. Algo así como la cábala de los místicos judíos. Pero hay que recordar que si bien Kepler

fue uno de los primeros astrónomos modernos, también era un hombre de la Edad Media que hacía horóscopos y terminó siendo astrólogo del rey[20].

El golpe de gracia al sistema ptolemaico lo dio Galileo (1564-1642). Munido de un telescopio fabricado por él mismo, basado en los que se acababan de dar a conocer en Holanda, Galileo miró al cielo y vio que Júpiter... ¡tiene lunas! O sea que la Tierra con su luna no es nada único y especial; he aquí otro planeta que es el centro alrededor del cual giran lunas. Más aún: ¡las lunas de Júpiter obedecen las leyes de Kepler! Y cuando Galileo miró a Venus con su telescopio vio que Venus... ¡tenía fases, igual que nuestra luna! Las fases que se observan no son consistentes con un sistema geocéntrico: se ven fases que implican que Venus en su recorrido llega a estar del otro lado del sol respecto de la Tierra. Estas dos observaciones son las primeras evidencias que apoyan a la teoría copernicana.

Además, con su telescopio, Galileo notó que tanto la luna como el sol son cuerpos imperfectos (la luna no es perfectamente redonda; el sol tiene manchas). Estas evidencias se suman a la lista de fallas en las suposiciones, ya bastante desacreditadas, de los griegos.

La historia de Galileo es conocida. No era alguien demasiado simpático. Kepler le pidió que le enviara un telescopio para poder ver con sus propios ojos que las lunas de Júpiter obedecían a las leyes que él había enunciado. Galileo, que había andado distribuyendo telescopios a la gente poderosa de su entorno, nunca encontró el momento para mandarle un instrumento a Kepler. Uno de los poderosos a quien Galileo regaló un telescopio fue el Duque de Venecia, con quien se congració explicando que con su instrumento se podían ver barcos lejanos y así saber si eran mercaderes amigos o enemigos.

Galileo creyó que sus observaciones con el telescopio terminarían de convencer a la gente de que no quedaban razones para no aceptar el sistema copernicano. Juzgó erróneamente a la Iglesia, que le previno que no enseñara la teoría copernicana como cierta sino como una de varias explicaciones posibles. Esto suena terriblemente moderno, como calcado de lo que viene ocurriendo con la teoría de la evolución en los Estados Unidos y últimamente también en Italia. Lo cierto es que el libro de Copérnico fue colocado en el Índex de lecturas prohibidas por la Iglesia,

[20] Su madre también era mujer de la época: estuvo presa por bruja.

pero Galileo, envalentonado por su buena relación con el nuevo Papa (Urbano VIII) publicó sus Diálogos en los que defendía al sistema copernicano. La Inquisición le hizo juicio, y lo obligó a firmar un documento en el que reniega del sistema copernicano. Se dice que Galileo meneó la cabeza al firmar y musitó: "Eppur si muove" -"Sin embargo (la Tierra) se mueve". Terminó sus días en prisión preventiva en su casa. Su libro fue puesto en el Índex y, junto con el de Copérnico y alguno de Kepler, allí quedó como lectura proscripta hasta 1835.

Capítulo 7
La gran síntesis

Y así llegamos a Isaac Newton (1642-1727), con quien culmina esta historia. Newton, como Galileo antes que él y Aristóteles aún antes, se había interesado por el movimiento de los objetos aquí sobre la Tierra. Aristóteles, que tenía explicaciones para todo, sostenía que los objetos terrestres y los objetos celestiales son fundamentalmente diferentes. Todos los objetos, terrestres y celestiales, tienen un lugar propio o natural, y un movimiento natural que los lleva hacia ese lugar propio. Ya vimos que para Aristóteles -y estas ideas todavía estaban en vigencia mil seiscientos años después-el lugar propio de los objetos celestiales es el de círculos alrededor de la Tierra (que está inmóvil y es el centro del universo), y el movimiento natural sobre los círculos es siempre uniforme, o sea, con velocidad constante.

Como caen en la Tierra...

Los objetos terrestres, dice Aristóteles, están compuestos de mezclas de cuatro elementos básicos: tierra, agua, aire y fuego. Esta sería la primordial tabla periódica de los elementos, o sea, la concepción aristotélica de la química. (Los astros están compuestos solamente de otro elemento, la "quinta esencia"). Los cuatro elementos tienen, cada uno, su lugar natural: el agua encima de la tierra, el aire encima del agua, y por encima de todo, el fuego. El movimiento natural de un cuerpo terrestre depende de las proporciones de los elementos que lo componen. Así, las burbujas en el agua suben hacia el aire. Y una roca que cae en el aire pasa a través del agua y llega a su lugar natural que es la tierra.

Sucintamente, para lo que nos ocupa aquí, Aristóteles explicaría que una manzana, al desprenderse del árbol, tiende a su lugar natural, la tierra, y es por eso que cae hacia abajo. El movimiento natural de la manzana sería el movimiento acelerado con que cae. No habría nada más para explicar.

Lo antedicho es lo que Galileo, diecinueve siglos después de Aristóteles, seguramente aprendió en sus estudios en la Universidad de Pisa. Pero con Galileo

hay un cambio fundamental en la forma en que se aborda la descripción y explicación de la naturaleza. La cosmología de Aristóteles -su "doctrina de todo"- explicaba el porqué de las cosas sin preocuparse demasiado del cómo. No se hacían experimentos ni mediciones detalladas y se consideraba suficiente que el porqué explicara los sucesos naturales en forma cualitativa. Galileo en cambio, enfoca el cómo y busca descripciones cuantitativas, matemáticas, de los fenómenos. Su ley, que describe en detalle cómo caen los cuerpos, es la base firme sobre la que su sucesor, Newton, construye una teoría explicativa científica.

La piedra de toque de la propuesta newtoniana es la noción de "fuerza". Mientras que Aristóteles dice que las cosas caen porque buscan su lugar natural, Newton afirma que caen por la fuerza de gravedad. Pero la palabra gravedad no explica nada. Con Newton, llamamos gravedad a la fuerza de atracción que ejerce la Tierra y que se manifiesta en el peso de los objetos. En la ausencia de otras fuerzas, un objeto atraído por la Tierra se precipita en caída libre. El caso ejemplar de esto es la proverbial manzana que, según nos cuentan, inspiró a Newton con la idea de la gravitación universal. ¿Y si la luna, igual que la manzana, también cayera hacia la Tierra? ¿Cómo sería esa fuerza de atracción que hace caer tanto a la luna como a la manzana?

Ahora bien, Newton era un tanto neurótico[21], y pasó los veinticinco años fructíferos[22] de su carrera prácticamente encerrado en sus aposentos en la Universidad de Cambridge. Consideraba que argumentar con sus colegas era una pérdida de tiempo y su reclusión era tal que no se conoce cabalmente la génesis y el derrotero de sus pensamientos. El hecho es que la noción de "fuerza" le da mucho que pensar y recién en 1687, sólo a instancias de un amigo y colega (Halley, el del corneta), publica el libro que lo hará famoso, su último trabajo científico, Principia, en el que presenta sus investigaciones sobre las fuerzas de la naturaleza.

---

[21] "Profundamente neurótico", dice J. M. Keynes en su discurso con motivo de la celebración de los trescientos años del nacimiento de Newton (Physics and Man, Nueva York, R. Karplus, Benjamin, 1970, p. 22).

[22] Durante este período escribió sus tratados científicos y también una cantidad equivalente o mayor de tratados sobre alquimia y teología, tópicos que aparentemente ocupaban gran parte de su tiempo. Newton produjo su obra principal, los Principia, a los cuarenta y cinco años. Desde entonces hasta su muerte, cuarenta años más tarde, fue director de la Casa de la Moneda (donde introdujo el borde aserrado en las monedas para impedir que la gente les rebanara tajaditas de plata), presidente de la Academia Real de Ciencias y hombre de mundo alabado, buscado y respetado. No publicó nada más.

En Principia, Newton da a conocer su formulación de las tres leyes que rigen el movimiento de los objetos en la Tierra. La primera es una reformulación de lo que ya había postulado Galileo, a saber: un objeto que está en reposo (o en movimiento uniforme) permanece en reposo (o en movimiento uniforme) siempre que no actúe una fuerza exterior. O sea, el reposo o el movimiento uniforme es el "lugar natural" de los cuerpos[23].

Para mover un cuerpo que está en reposo, o para cambiar la velocidad (acelerar) o la dirección del movimiento de un objeto, hace falta una fuerza. El objeto acelera si la fuerza actúa en la dirección en que el objeto se mueve. Para cambiar la dirección del movimiento del objeto la fuerza tiene que aplicarse hacia un lado. Desde el punto de vista newtoniano, entonces, lo interesante son los cambios, y lo que efectúa los cambios es una fuerza.

Para los aristotelianos, "fuerza" es lo que se necesitaba para mantener el movimiento uniforme. Evidentemente, esto es lo que parecen indicar nuestros sentidos ya que, por ejemplo, para mantener una velocidad constante cuando andamos en automóvil, tenemos que apretar el acelerador. Pero esto es así porque hay que superar la fricción, que es una fuerza externa. Galileo fue quien dio el salto conceptual de idealizar los movimientos terrestres y se dio cuenta de que si no hubiera fricción —si pudiéramos abstraer la fricción— la velocidad constante o el estado de reposo se mantendrían indefinidamente.

La segunda ley de Newton, que vincula fuerza, masa y aceleración, es una expresión matemática que permite calcular cuantitativamente el efecto de las fuerzas sobre el movimiento de los objetos.

La tercera ley de Newton expresa que las fuerzas vienen siempre de a pares. Hay simetría: aquello que empuja algo (ejerce fuerza sobre algo) es, a su vez, empujado por ese "algo". En el caso de una manzana que cae, la Tierra ejerce fuerza sobre la manzana; y la manzana ejerce una fuerza igual sobre la Tierra (sólo que la fuerza de la manzana no alcanza para mover la Tierra).

...así caen en el cielo

---

[23] Se ha sugerido que éste hubiera sido un buen epitafio para la tumba de Newton: "Un cuerpo en reposo permanece en reposo".

Tenemos, entonces, tres leyes que rigen el movimiento de los cuerpos en la Tierra. Y otras tres leyes, las de Kepler, que rigen los movimientos de los planetas en el cielo. La tónica del pensamiento de Newton es su convicción de que la mecánica de los cuerpos celestiales es explicable con conceptos y leyes terrestres. Así es que Newton combina sus leyes con las de Kepler, lo que le permite ir más allá de la formulación geométrica de Kepler y encontrar la fuerza, el motor del movimiento de los planetas.

Si, como enuncia Kepler, los planetas describen órbitas elípticas alrededor del sol, según Newton tiene que haber una fuerza que cause el movimiento curvo. De lo contrario, los planetas seguirían de largo, de la misma forma que una boleadora viaja en camino recto desde el momento en que mi mano no la sujeta.

La naturaleza de la fuerza que mantiene a los planetas en sus órbitas es un problema netamente postaristoteliano. En el esquema de Aristóteles, recordemos, los planetas describen órbitas porque ese es su lugar y su movimiento "natural", así que no había nada para explicar. Pero gente como Kepler y Descartes[24] ya se habían ocupado del problema de la fuerza. Kepler hablaba de una atracción magnética del sol hacia los planetas. Descartes hablaba de un fluido invisible que llenaba el espacio[25] y en el que surgían vórtices o espirales que movían a los planetas. Otra explicación, pintoresca pero anónima[26], era que ángeles invisibles batían las alas detrás de los planetas, arreándolos hacia adelante. Con Newton desaparece la necesidad de una fuerza que empuje a los planetas alrededor del sol y aparece la explicación basada solamente en una fuerza proveniente de y dirigida hacia el sol (lateral al movimiento del planeta en la órbita).

Usando las otras dos leyes de Kepler, Newton comprobó que la dirección de la fuerza es precisamente a lo largo del eje planeta-sol, y que la magnitud de la fuerza varía inversamente con el cuadrado de la distancia entre el planeta en cuestión y el sol (o sea, cuanto más lejos esté el planeta del sol, la fuerza de atracción será menor; para un planeta que dista el doble que otro del sol, la fuerza de atracción es cuatro veces menor). La matemática involucrada en la comprobación no era simple

[24] Filósofo francés del siglo XVII.
[25] La idea de fluidos invisibles y efluvios emanentes aparece una y otra vez en la historia de la ciencia para explicar fenómenos indescifrables.
[26] Feynman, R., Lectures on Physics, vol. I, sec. 7-3, Massachusetts, Addison-Wesley, 1963.

y evidente[27]. De ahí la presión del medio científico (a través del amigo Halley) para que Newton la publicara.

Hasta acá, Newton provee la dirección y la magnitud relativa de la fuerza. Pero para conocer el valor absoluto de la magnitud de la fuerza faltaba alguna conjetura sobre la naturaleza de esa fuerza. Y aquí es donde Newton lanza su gran generalización, proponiendo que todos los cuerpos, tanto en el cielo como en la Tierra, se atraen mutuamente con una fuerza gravitacional como la que hace caer la manzana a tierra. Esta propuesta se conoce como la teoría de la gravitación universal.

Para poner en uso su teoría, Newton retorna al caso de la luna en su órbita alrededor de la Tierra. Newton trata el movimiento de la luna como una caída constante causada por la fuerza gravitacional ejercida por la Tierra, al igual que la caída de un objeto (la manzana de los ejemplos). ¿Cómo? ¿La luna cae hacia la Tierra? Esta idea puede ser un tanto confusa, porque en realidad la luna cae hacia la Tierra sin acercarse. Si no estuviera "cayendo" seguiría en línea recta, ¿verdad? Podemos pensar la caída, entonces, como el alejamiento de la línea recta que describiría si no estuviera la fuerza de la Tierra. Volviendo al ejemplo de las boleadoras: la soga que tengo en las manos cuando las revoleo ejerce una fuerza (que siento en la mano) que mantiene a las boleadoras describiendo un círculo. La fuerza que siento en la mano sería el equivalente de la fuerza de atracción gravitacional de la Tierra sobre la luna.

Usando su propuesta de gravitación universal para calcular el tiempo de revolución de la luna alrededor de la Tierra, Newton obtuvo muy buen acuerdo con las observaciones. Alentado por este resultado, utilizó la teoría para explicar cómo la atracción del sol y la luna sobre los mares de la Tierra producen las mareas, y también para calcular la masa de planetas que tienen lunas. A su amigo Halley la teoría le permitió predecir y explicar las apariciones del cometa que lleva su nombre. Sus sucesores aplicaron la teoría para explicar perturbaciones observadas en la órbita del planeta Urano y esto llevó al descubrimiento de un nuevo planeta, Neptuno. El alcance de la teoría es poderoso: se aplica con éxito también fuera del sistema solar, a las estrellas e incluso a otras galaxias.

---

[27] Newton se vio obligado a inventar el cálculo diferencial para resolver este problema.

Este cuento, entonces, concluye con la gran síntesis lograda por Newton. Por fin desaparece la dicotomía aristotélica entre el cielo y la Tierra. La teoría de la gravitación universal sirve para describir los movimientos de todos los objetos, dondequiera, con una única ley. Hasta que llega un tal Einstein y prueba que la ley de Newton también tiene sus limitaciones... Pero esto va mucho más allá de la astronomía a simple vista.

Epílogo

En una de sus clases de física en Caltech, Richard Feynman[28] les comentó a sus alumnos lo siguiente (en traducción libre):

Los poetas dicen que la ciencia les quita belleza a las estrellas, al decirnos que son meramente átomos de gas apelmazados. No hay tal 'meramente'. Yo también puedo ver y sentir las estrellas en una noche clara. Pero, porque sé un poco, ¿veo y siento más o veo menos?

Varado en esta Tierra nuestra, calesita en el espacio, veo la luz que viene viajando desde hace un millón de años. Quizá la sustancia de la que estoy hecho es el gas de una estrella ya olvidada, así como ahora vomitan sustancia las estrellas que veo brillar en la vastedad de los cielos. También puedo mirar las estrellas con el gran ojo del telescopio del observatorio, y verlas alejándose de un punto de partida donde quizás hayan estado todas juntas. ¿Cuál es el patrón según el cual se mueven? ¿Qué significado tiene? ¿Cuál es el porqué?

El misterio no se desvirtúa porque sepamos un poquito. Lo que sucede en la vastedad de los cielos es más maravilloso de lo que los poetas han podido imaginar...

Quiero suponer que ustedes, lectores que me han acompañado hasta aquí, "varados en esta Tierra nuestra, calesita en el espacio", estarán de acuerdo en que el misterio y la poesía de los cielos no sólo no se desvirtúan porque sepamos un poquito, sino que se magnifican. La maravilla está en mirar y reconocer los patrones de los movimientos, las eternas regularidades... y por lo tanto, también en sorprenderse con las singularidades, los eventos únicos. Más aún, está la maravillosa aventura del pensamiento, empezando con nuestros antepasados que reconocieron qué sucedía en el cielo y comenzaron a tabular las regularidades de los movimientos de los astros y a usarlas para predecir acontecimientos futuros. Luego pasamos por los griegos y sus modelos mecanicistas creados para explicar cómo

---

[28] Feynman fue un físico teórico, contemporáneo, premio Nobel por su desarrollo de la electrodinámica cuántica. Su poderoso intelecto unido a un gran sentido del humor hacían de él un personaje pintoresco. Se dice que ante la perspectiva de un viaje a Brasil se tomó el trabajo de aprender español y se sorprendió mucho porque, al llegar a Río de Janeiro, no entendía nada de lo que decía la gente.

sucedían esos movimientos regulares y, finalmente, llegamos, con los albores de la ciencia moderna, a las leyes y teorías desarrolladas para ir explicando el porqué de lo que vemos en el cielo.

Resulta —y no es casualidad— que este paseo que hemos dado juntos dentro de la física y la astronomía, además de evocar maravillas, nos permitió presenciar la construcción del conocimiento científico. Uno de los aspectos más característicos es que este conocimiento es empírico, es decir, que la ciencia está fundamentalmente asada en los fenómenos del mundo que nos circunda, aprehensibles mediante observaciones. En nuestro recorrido, visitamos el aspecto empírico de la ciencia y la metodología que emplea cuando efectuamos observaciones y tomamos datos, y también cuando pasamos revista, en particular, a las contribuciones de Tycho Brahe y Kepler. Otro aspecto fundamental del conocimiento científico es su carácter abstracto, que se manifiesta en la creación de conceptos, modelos y teorías, tal como lo vimos en la formulación de los varios modelos teóricos: desde los más simples modelos griegos hasta la elaboración de la teoría de Newton. Finalmente, el aspecto social de la ciencia estuvo bordeando nuestro camino todo el tiempo: vimos la influencia de las necesidades religiosas (como la propiciación de los dioses) y prácticas (como las predicciones de interés para la agricultura) en la Antigüedad; describimos el peso del respeto a la autoridad en la adopción de modelos teóricos (como en el caso de Aristóteles) y la fuerza de las instituciones establecidas para entorpecer el avance de ideas (es el caso de la Iglesia versus Galileo).

Y aquí, queridos lectores, el guía los deja. Los deja, espero, munidos de una idea conceptual de cómo se hace ciencia, y de una curiosidad intensa por saber más sobre los cielos.

Bibliografía comentada

Asimov, I. — El Universo, Barcelona, Alianza Editorial, 1984.
Asimov on Astronomy, Nueva York, Anchor Books, Doubleday, 1975. (Existe una traducción inconseguible: Astronomía de Asimov.)
Una serie de ensayos en el estilo ameno de este conocido popularizador, publicados originalmente en la Revista de fantasía y ciencia ficción

Brecht, B. — Galileo Galilei, Teatro Completo, Barcelona, Alianza Editorial, 1994..
Obra teatral clásica de sesgo político

Cassidy, D.; Holton, G. y Rutherford, J. — Understanding Physics, Nueva York, Springer-Verlag, 2002.
Exposición cuidadosa e inteligente de los temas tratados en Cielito lindo.

Dampier, W. C. — Historia de la Ciencia y sus relaciones con la filosofía y la religión, Madrid, Tecnos, 1995.
Un bello clásico.

Davies, P. — Los últimos tres minutos, Madrid, Debate, 2001.
Una obra de divulgación cosmológica escrita por un experto en el tema.

Feinstein, A.; Tignatelli, H. — Una visita al universo conocido, Buenos Aires, Ediciones Colihue, 1994.
Pequeño libro amable sobre los objetos del universo

Holton, G. y Roller, D. H. D. — Fundamentos de física moderna, partes 3 y 4, Barcelona, Reverté, 1963
Los modelos celestes, con énfasis en la contribución de Newton, presentados desde un punto de vista histórico y filosófico.

Hoyle, F. — Iniciación a la astronomía, Madrid, Blume, 1984.
Historia de la investigación del universo, con espléndidas ilustraciones.

Koestler, A. — Kepler, Barcelona, Salvat Editores, 1988.
Interesante biografía de Kepler.

Krupp, E. C. — En busca de las Antiguas Astronomías, Madrid, Pirámide, 1989.
Primer libro popular sobre Arqueoastronomía editado por el director del Observatorio Griffith de Los Ángeles.

Kuhn, T. S. — La Revolución Copernicana, Barcelona, Ariel 1978.
Interesantísimo y ya clásico análisis de la dinámica social en esta revolución científica.

Levy, D. — Observar el Cielo I, Barcelona, Planeta, 1995.

Burnham, R.; Dyer, A.; Garfinkle, R. A.; George, M.; Kanipe, J. y Levy, D. H. — Observar el Cielo II, Barcelona, Planeta, 1998.

Lockyer, N. J. — The Dawn of Astronomy, Massachusetts, The MIT Press, 1964 (sin traducción).
Publicado originalmente en 1894, este estudio de los templos y mitología de los antiguos egipcios es un clásico reeditado.

Menzel, D. H. y Pasachoff, J. M — Guía de Campo de las estrellas y los planetas, Madrid, Omega, 1990. *Para el bolsillo y la mochila del astrónomo aficionado, con cartas astronómicas muy completas.*

Reeves, H. — Últimas noticias del Cosmos, Santiago, Andrés Bello, 1996.

Rey, H. A. — The stars, Boston, Massachusetts, Houghton Mifflin Co., 1970. *Lindísimo manual para observaciones a simple vista.*

Rogers, E. — Physics for the Inquiring Mind, Part 2, Princeton, Princeton University Press, 1965. *Magnífica historia de los modelos y del pensamiento científico sobre astronomía.*

Sobel, D. — La hija de Galileo, Madrid, Debate, 1999. *Galileo visto a través de la correspondencia con su hija.*

www.cielosur.com — Un sitio web en español con mucha información sobre astronomía